

**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU**  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**

# **ZAVRŠNI RAD**

**Boris Nikolić**

Zagreb, 2013.

**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU**  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**

**ZAVRŠNI RAD**

Mentor:

Doc. dr. sc. Danijel Pavković, dipl. ing.

Student:

Boris Nikolić

Zagreb, 2013.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se prije svega mentoru, Doc. dr.sc. Danijel Pavkoviću, na pomoći koju mi je pružio tijekom izrade ovoga rada. Također zahvaljujem kolegi Luki Orsagu na korisnim savjetima.

Boris Nikolić

*Ovdje umetnuti ovjereni zadatak*

## SADRŽAJ

POPIS SLIKA .....	I
POPIS TABLICA.....	II
POPIS OZNAKA .....	III
SAŽETAK.....	IV
1. UVOD .....	1
2. MAKETA.....	3
2.1. Energetski dio.....	3
2.1.1. Transformator i Punovalni ispravljač .....	4
2.1.2. Tranzistorski pretvarač (chopper).....	4
2.1.3. Istosmjerni motor s inkrementalnim davačem.....	7
2.2. Upravljački dio (PLC) .....	9
2.2.1. PLC kutija Siemens SIMATIC S7-200 .....	9
2.2.2. Programsko okruženje STEP 7 MicroWIN .....	16
2.3. Ožičenje laboratorijske makete .....	23
3. SNIMANJE KARAKTERISTIKE TRANZISTORSKOG PRETVARAČA.....	26
4. REGULACIJA BRZINE VRTNJE DC MOTORA PI REGULATOROM .....	27
4.1. Projektiranje regulatora .....	28
4.2. Simulacija sustava u Simulink-u .....	30
5. EKSPERIMENTALNI REZULTATI.....	32
5.1. Identifikacija matematičkog modela motora .....	32
5.2. Implementacija PI regulatora u PLC-u.....	36
5.3. Eksperimentalni rezultati.....	39
6. ZAKLJUČAK .....	41
LITERATURA.....	42
PRILOZI.....	43

## POPIS SLIKA

Slika 1.	Cijeli sustav na Katedri za strojarSKU automatiku .....	2
Slika 2.	Energetski dio makete (bez motora).....	3
Slika 3.	Punovalni ispravljač s transformatorom.....	4
Slika 4.	Principna shema tranzistorskog frekvencijskog pretvarača za rad.....	4
Slika 5.	Objašnjenje rada tranzistorskog H-mosta.....	5
Slika 6.	Valni oblik napona armature za rad u 1. kvad. i periodi uključenosti dioda i tranz. ....	6
Slika 7.	Shematski prikaz rada frekvencijskog pretvarača u sva četiri kvadranta.....	6
Slika 8.	Ovisnost faktora popunjenosti o referentnom naponu PWM sklopa.....	7
Slika 9.	DC motor sa inkrementalnim davačem.....	8
Slika 10.	Sklop inkrementalnog davača s valnim oblikom na izlazu .....	8
Slika 11.	S7-200 u laboratoriju na Katedri za strojarSKU automatiku (pogled sprijeda).....	9
Slika 12.	Modul napajanja LOGO! Power .....	10
Slika 13.	CPU 224.....	11
Slika 14.	SCAN CYCLE PLC-a S7-200 .....	12
Slika 15.	Principna shema spajanja digitalnih izlaza.....	14
Slika 16.	Digitalni ulazni krug.....	15
Slika 17.	Principna shema spajanja digitalnih ulaza.....	15
Slika 18.	Principna shema spajanja analognih izlaza modula EM 232 .....	16
Slika 19.	„MAIN“ dio Ladder dijagrama u STEP 7 MicroWIN .....	17
Slika 20.	Način rada „0“: jednofazno brojilo s internim upravljanjem smjerom brojanja .....	18
Slika 21.	Tab „INIT_FUN“: Pokretanje i inicijalizacija Brzog brojila .....	21
Slika 22.	Tabovi „MAIN“ i „INIT_FUN“: Mjerenje brzine vrtnje.....	21
Slika 23.	Tab „SPD_MEAS“.....	22
Slika 24.	Tab „SPD_MEAS“ (nastavak).....	22
Slika 25.	Stražnja strana PLC kutije spojena s ostatkom makete .....	23
Slika 26.	Konektor DB-25-2 .....	24
Slika 27.	Konektor DB-15-4 .....	25
Slika 28.	Karakteristika tranzistorskog pretvarača (choppera).....	26
Slika 29.	Potpuni dinamički model DC motora s tranzistorskim pretvaračem.....	27
Slika 30.	Ekvivalentni vremensko-kontinuirani regulacijski krug brzine vrtnje s PI reg.....	28
Slika 31.	Simulacijski model „sim_mdl.mdl“ .....	30
Slika 32.	Rezultati simulacije (bez kvantizacije).....	30
Slika 33.	Simulacijski model „sim_mdl3.mdl“ .....	31
Slika 34.	Rezultati simulacije (sa kvantizacijom) .....	31
Slika 35.	Prikaz brzine vrtnje motora .....	32
Slika 36.	Prikaz pozicije motora.....	33
Slika 37.	Proračun parametara regulatora u programu, zajedno s Data Block-om.....	36
Slika 38.	Tab „PI_REG“: Impelencija PI regulatora u STEP 7 MicroWIN-u.....	37
Slika 39.	Tab „INTR_SBR“ .....	38
Slika 40.	Tablica simbola (Symbol Table) .....	38
Slika 41.	Eksperimentalni rezultati s promjenjivim parametrom D3ω.....	39
Slika 42.	Eksperimentalni rezultati testiranja limitera napona .....	40

## POPIS TABLICA

Tabela 1. Specifikacije modula napajanja LOGO! Power .....	10
Tabela 2. Opis komunikacijskog port-a modula S7-224.....	14
Tabela 3. Specifikacije digitalnih izlaza .....	14
Tabela 4. Specifikacije digitalnih ulaza .....	15
Tabela 5. Podaci analognih izlaza modula EM 232 .....	16
Tabela 6. Raspoloživa brojila i načini rada (mode) .....	18
Tabela 7. Kontrolni bitovi (SMB 47) .....	19
Tabela 8. Postavljanje početne vrijednosti i postavne (preset) vrijednosti .....	19
Tabela 9. Adrese trenutnih vrijednosti brojanja (32-bitni registri). ....	19
Tabela 10. Statusni bitovi (read-only) brzih brojila .....	20
Tabela 11. Spoj konektora DB-25-2 s digitalnim ulazima na CPU-224.....	24
Tabela 12. Spoj konektora DB-15-4 s digitalnim ulazima na EM 232 .....	25
Tabela 13. Dobivanje početne i konačne brzine vrtnje.....	33
Tabela 14. Iznosi pozicije u trenucima $t$ .....	34

## POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
$U_{xy}, u_a$	V	Napon na armaturi motora (izlaz iz choppera)
$u$	V	Napon na ulazu choppera
$U_b$	V	Napon na izlazu iz ispravljača
$f_{ch}$	Hz	Frekvencija choppera
$T$	s	Period choppera
$d$		Faktor popunjenosti (duty cycle)
$T_+$	s	Pozitivni dio perioda choppera
$T_-$	s	Negativni dio perioda choppera
$U_{sr}$	V	Srednja vrijednost pravokutnog valnog obl. napona armature
$K_{ch}$	V/V	Pojačanje tranzistorskog pretvarača
$T_{ch}$	s	Vremenska konstanta tranzistorskog pretvarača
$G_{ch}(s)$		Nadomjesna dinamika (kašnjenje) tranzistorskog pretvarača
$U_{pm}$	V	Ulazni napon PWM sklopa
$\omega$	rad/s	Brzina vrtnje motora
$f_{imp}$	Hz	Frekvencija impulsa na izlazu inkrementalnog davača
$T_{imp}$	s	Period impulsa na izlazu inkrementalnog davača
$R_D$		Rezolucija inkrementalnog davača (broj utora)
$T_a$	s	Armatura vremenska konstanta
$T_{em}$	s	Elektromehanička vremenska konstanta
$K_p$	rad/Vs	Pojačanje procesa
$K_m$	Nm/A	Konstanta motora
$K_e$	Vs/rad	Konstanta EMS
$K_a$	A/V	Konstanta armature
$t$	s	Vrijeme
$\alpha$	rad	Pozicija motora
$T$	s	Vrijeme uzorkovanja
$\omega_{ss1}$	rad/s	Početna brzina vrtnje
$\omega_{ss2}$	rad/s	Konačna brzina vrtnje
$\alpha_0$	rad	Početna pozicija motora
$\alpha_{FIN}$	rad	Konačna pozicija motora
$T_{FIN}$	s	Vremenski interval između pozicija $\alpha_{FIN}$ i $\alpha_0$
$\Delta\alpha$	rad	Razlika konačne i početne pozicije
$\Delta\omega_{ss}$	rad/s	Razlika konačne i početne brzine vrtnje
$\Delta u$	V	Naponski skok sa tranzistorskog pretvarača
$T_{e\omega}$	s	Ekvivalentna vremenska konstanta regulacijskog kruga
$T_I$	s	Integralna vremenska konstanta
$K_R$	Vs/rad	Pojačanje regulatora
$K_I$	Vs/rad	Integralno pojačanje i PI regulatoru
$D_{2\omega}, D_{3\omega}$		Optimalni iznosi karakterističnog odnosa
$T_\Sigma$	s	Vremenska konstanta parazitske dinamike
$T_{par}$	s	Parazitska vremenska konstanta
$J$	kgm <sup>2</sup>	Moment inercije



## SAŽETAK

U ovom se radu opisuje ispitivanje laboratorijske makete s istosmjernim (DC) motorom koji je upravlján programibilnim logičkim kontrolerom. Maketa je osmišljena i izrađena na Katedri za strojarsku automatiku u suradnji s Prof. dr. sc. Davorom Zorcom, a svrha joj je da pomaže u edukaciji sadašnjih i budućih studenata na području digitalne regulacije kroz laboratorijske vježbe kolegija „Mikroprocesorsko upravljanje“, „Elektronika“ te drugih srodnih kolegija. U radu se identificira matematički model sustava četverokvadrantnog pretvarača snage (H-mosta) i istosmjernog motora s permanentnim magnetima male snage, te se na osnovi dobivenog modela projektira digitalni PI regulator čija se implementacija ispituje simulacijama na računalu i eksperimentalno na Siemensovom programibilnom logičkom kontroleru (PLC-u) porodice SIMATIC S7-200.

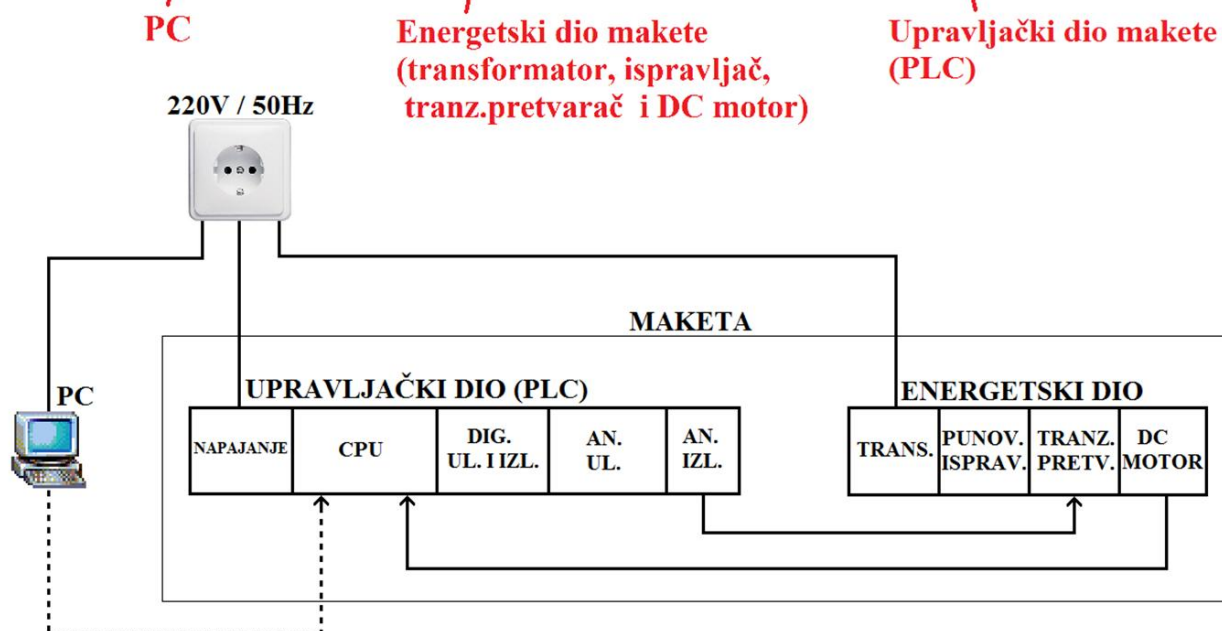
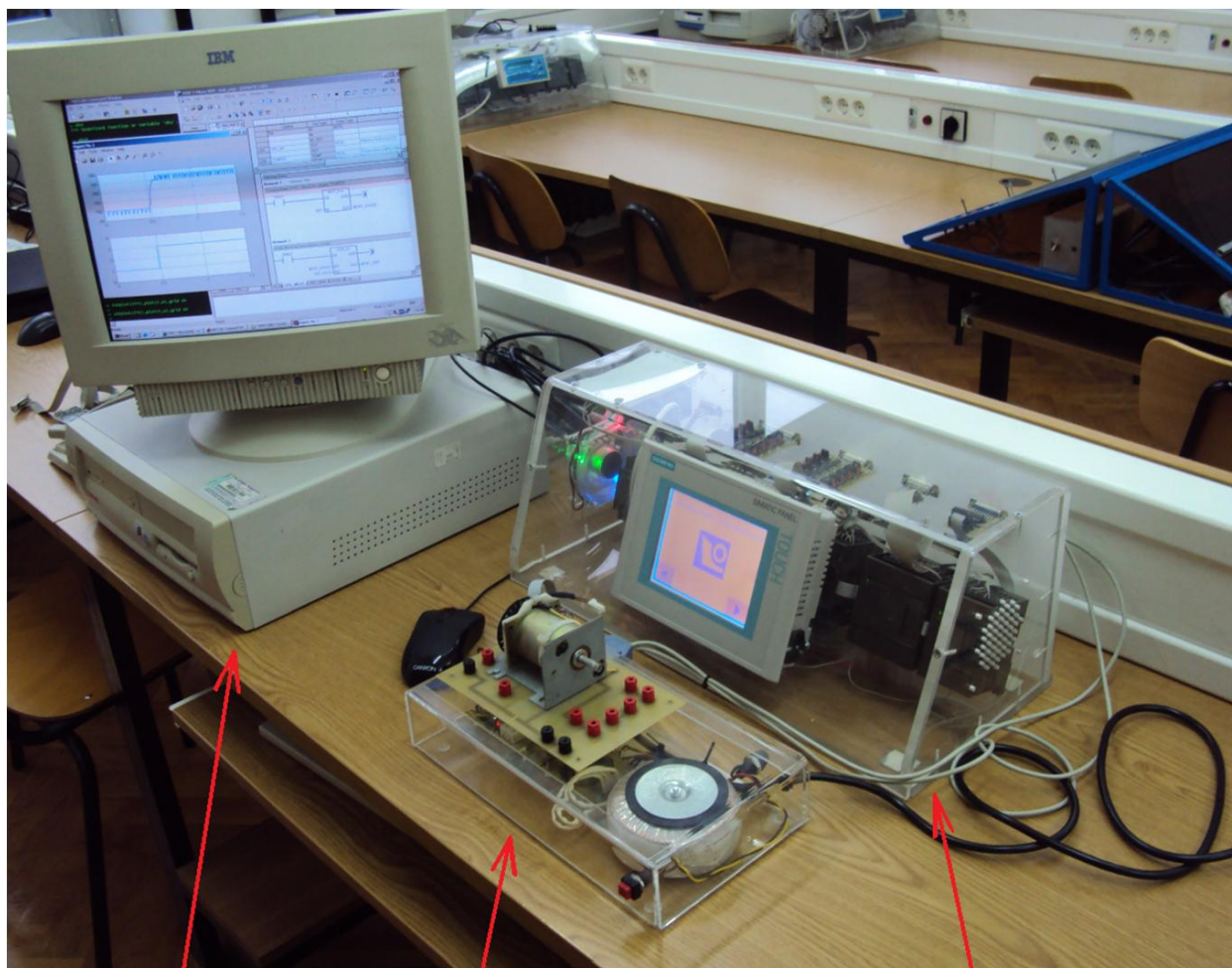
**Ključne riječi:** Programibilni logički kontroler (PLC), SIMATIC S7-200, pretvarač snage s H-mostom, eksperimentalna identifikacija, PI regulator brzine vrtnje

## 1. UVOD

U elektromotornim pogonima malih snaga (tipično do 50W) često se koriste istosmjerni (DC) motori s uzbudnim permanentnim magnetima upravljani iz razmjerno jeftinih chopperskih pretvarača snage. Pritom se od mjerenja najčešće koristi mjerenje pozicije (brzine vrtnje) primjenom jednostavnih senzora tipa inkrementalnih davača impulsa niske rezolucije, a mjerenje struje se najčešće izbjegava zbog cijene senzora i razmjerno visokog iznosa otpora armature čime se efektivno ograničava struja armature i umanjuje mogućnost strujnog preopterećenja pri potezanju i reverziranju.

U ovom radu se opisuje ispitivanje laboratorijske makete s DC motorom i pripadajućim pretvaračem snage zasnovanim na tranzistorskom H-mostu, a kojom se upravlja programibilnim logičkim kontrolerom SIMATIC S7-200. Na [Slika 1] je prikazana shema cijelog sustava zajedno s fotografijom sustava u laboratoriju. U radu se najprije opisuje sama laboratorijska maketa, odnosno njeni sastavni dijelovi: pretvarač snage (H-most), istosmjerni motor opremljen jednostavnim jednokanalnim inkrementalnim davačem impulsa, te PLC sustav zasnovan na Siemensovom SIMATIC S7-200 programibilnom kontroleru opremljenom analognim i digitalnim ekstenzijskim modulima. U radu se potom opisuje koncept regulacije brzine vrtnje zasnovan na PI regulatoru brzine vrtnje bez podređenog regulacijskog kruga struje armature, te s time povezan postupak podešavanja parametara regulatora zasnovan na poznatim parametrima nadomjesnog modela motora i kriteriju optimuma dvostrukog odnosa. Predloženi PI regulator brzine vrtnje preliminarno se ispituje simulacijama na računalu, te potom i eksperimentalno. Za potrebe simulacijskih testova i projektiranja regulatora, parametri modela motora se estimiraju na temelju identifikacijskih testova zasnovanih na odzivu motora na skokovitu promjenu referentne vrijednosti napona pretvarača.

Rad je organiziran kako slijedi. U poglavlju 2 ukratko se opisuje laboratorijska maketa DC motora s pretvaračem snage i programibilnim logičkim kontrolerom namijenjenim za upravljanje maketom. U poglavlju 3 opisuje postupak određivanja statičke karakteristike H-mosta, dok se u poglavlju 4 razrađuje koncept regulacije brzine vrtnje i opisuje postupak projektiranja PI regulatora brzine vrtnje, te se također se daju i rezultati simulacija predloženog regulacijskog sustava. U poglavlju 5 dani su rezultati eksperimentalne identifikacije matematičkog modela motora, te validacije predloženog PI regulatora brzine vrtnje. Zaključci i prijedlozi za daljnji rad dani su u poglavlju 6.



Slika 1. Cijeli sustav na Katedri za strojarSKU automatiku

## 2. MAKETA

PLC maketa opisana u uvodu sastoji se od sljedećih komponenti:

- energetskog dijela

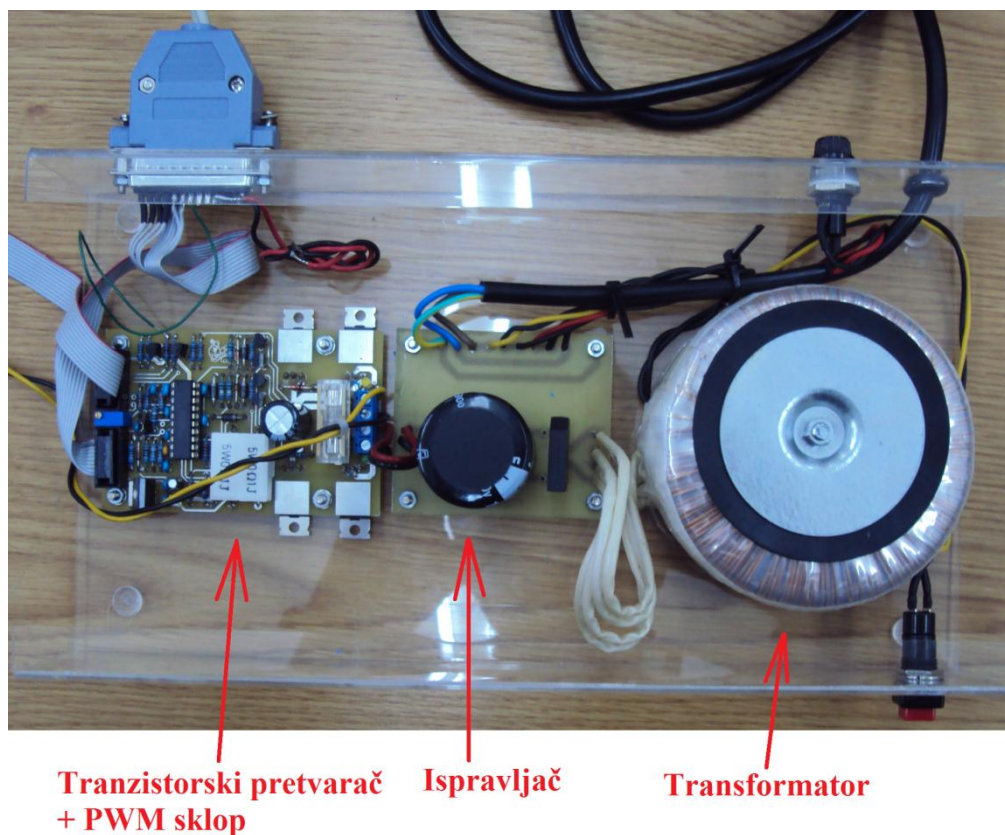
- Transformator
- Punovalni ispravljač
- Tranzistorski pretvarač (chopper)
- Istosmjerni motor

- upravljačkog dijela - PLC kutija Siemens SIMATIC S7-200 (opisana u idućim odjeljcima)

Funkcijski moduli korišteni u ovom radu detaljnije se opisuju u nastavku.

### 2.1. Energetski dio

Energetska elektronika je potrebna kako bi se izmjenični napon iz električne mreže pretvorio u istosmjerni napon prikladan za rad DC motora i elektroničkog sklopovlja. U ovom slučaju je potrebno napajati tranzistorski pretvarač s istosmjernim naponom iznosa  $U_b = 24\text{ V}$ . Za tu svrhu se koristi transformator i punovalni ispravljač. Na [Slika 2] je prikazan energetski dio makete (bez motora).

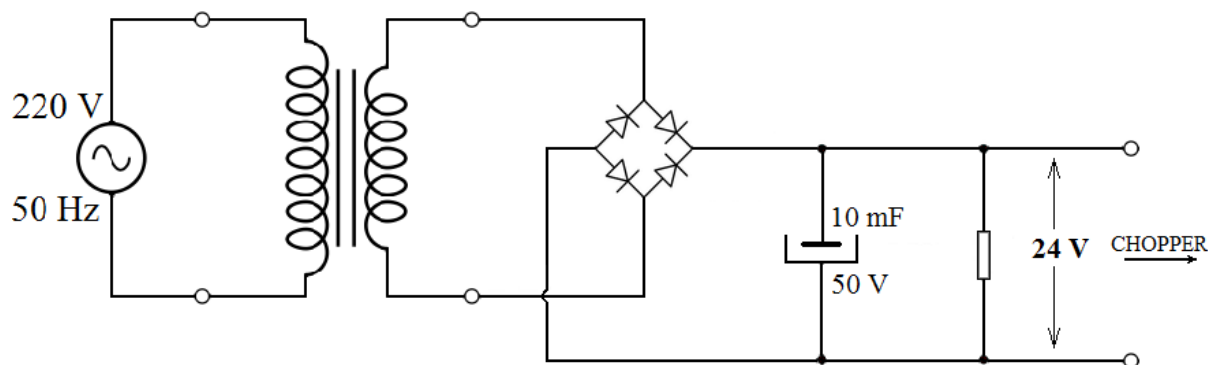


Slika 2. Energetski dio makete (bez motora)

### 2.1.1. Transformator i Punovalni ispravljač

Transformator je statički električni uređaj u kojem se električna energija iz jednog ili više izmjeničnih krugova koji napajaju primarne namotaje transformatora prenosi u jedan ili više izmjeničnih krugova napajanih iz sekundarnih namota transformatora s izmijenjenim iznosima jakosti struje i napona, te nepromijenjenom frekvencijom.

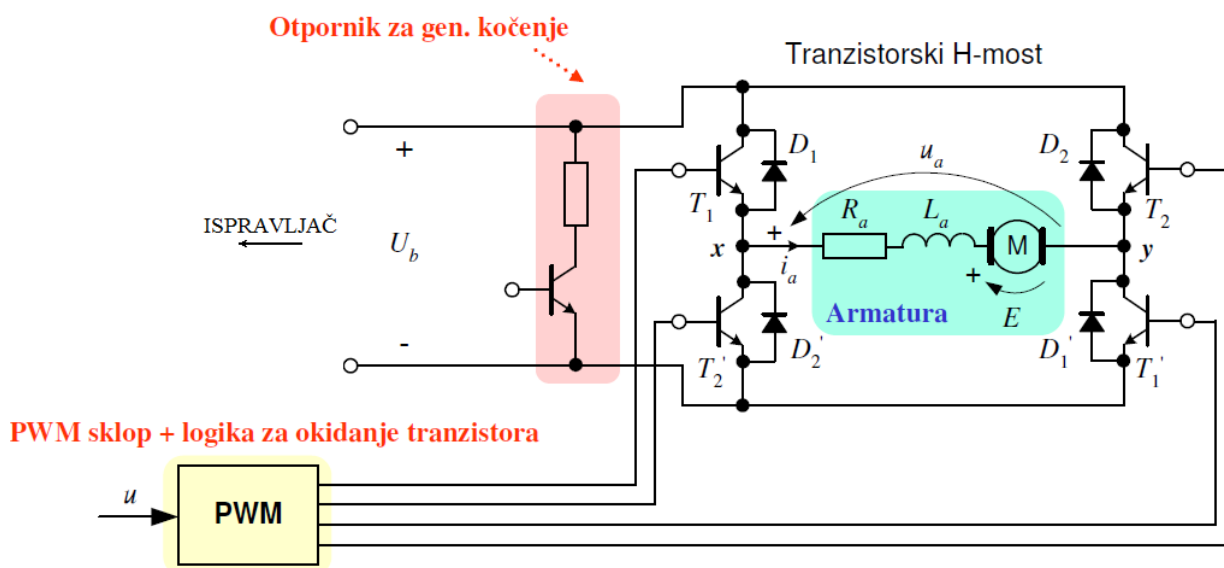
Ispravljač je uređaj koji ulaznu izmjeničnu veličinu preoblikuje u razmjernu istosmjernu veličinu na izlazu. U ovoj maketi se koristi punovalni ispravljač s Graetзовim spojem.



Slika 3. Punovalni ispravljač s transformatorom

### 2.1.2. Tranzistorski pretvarač (chopper)

Tranzistorski pretvarač je elektronički sklop čiji je glavni zadatak dovod odgovarajućeg napona na armaturu DC motora. Ključan je za upravljanje i regulaciju DC motora jer omogućuje brzo mijenjanje napona na armaturi motora. Kompletan električna shema tranzistorskog pretvarača zajedno s PWM sklopom (UC3638) je u prilogu [II] i [III]. Principna shema H-mosta iz [2] je prikazana na [Slika 4].



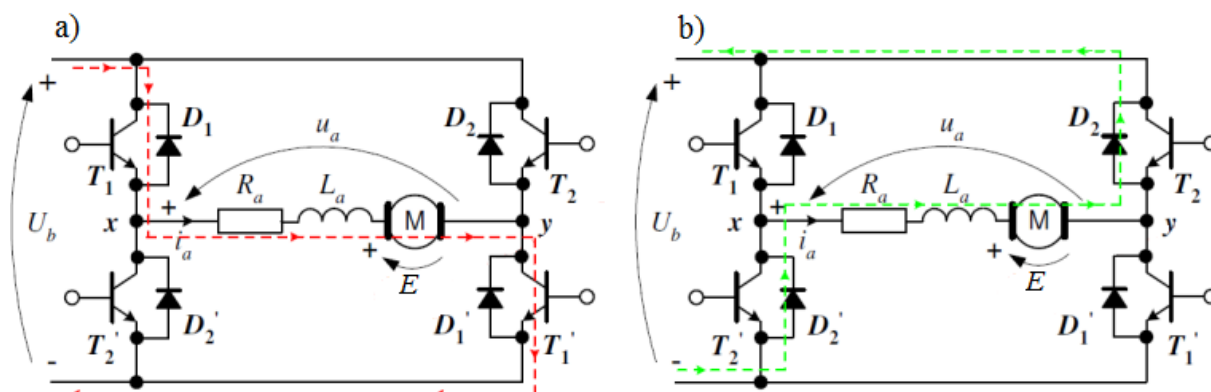
Slika 4. Principna shema tranzistorskog frekvencijskog pretvarača za rad



Jezgra tranzistorskog pretvarača je tranzistorski H-most kojim se motoru privodi napon na armaturu. H-most radi u prekidačkom režimu rada što znači da će i valni oblik napona na armaturi motora biti isprekidan. Željeni iznos napona na izlazu pretvarača zadaje se preko ulaznog (referentnog) signala PWM sklopa (napona  $u$ ), koji upravlja okidanjem pojedinih tranzistora u H-mostu (srednja vrijednost napona na izlazu pretvarača je proporcionalna ulaznom naponu PWM sklopa). H-most se napaja iz istosmjernog izvora napona. Koji se pak most napaja iz mrežnog ispravljača, te tada ispravljač na svom izlazu mora imati kondenzator visokog kapaciteta u svrhu izgladivanja napona istosmjernog međukruga.

Princip rada H-mosta (pretpostavlja se da su sve diode i tranzistori idealni):

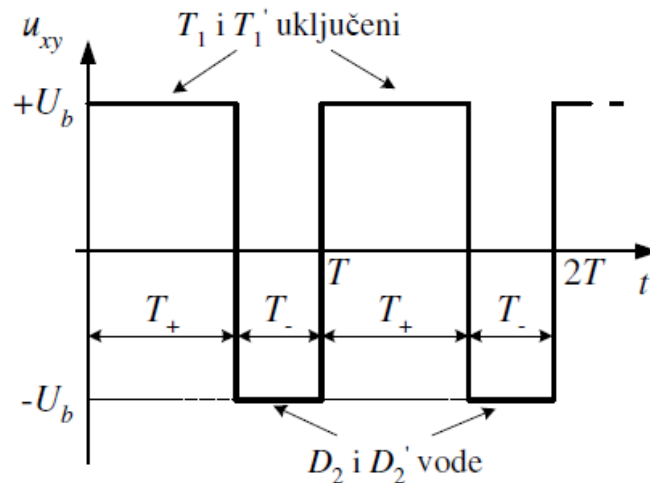
Uključivanjem tranzistora  $T_1$  i  $T_1'$ , između točaka  $x$  i  $y$  (armatura motora) dovodi se pozitivni napon istosmjernog međukruga ( $U_{xy} = +U_b$ ), dok se uključivanjem tranzistora  $T_2$  i  $T_2'$ , dovodi negativni napon istosmjernog međukruga ( $U_{xy} = -U_b$ ). Na [Slika 5] je objašnjen rad tranzistorskog H-mosta: **a)** Uključivanje tranzistora za rad u 1. kvadrantu. **b)** Isključivanje tranzistora i uključivanje komplementarnih dioda za rad u 1. kvadrantu.



**Slika 5. Objašnjenje rada tranzistorskog H-mosta**

Isključivanjem jednog para tranzistora (npr.  $T_1$  i  $T_1'$ ), došlo bi do prekidanja strujnog kruga, što može biti vrlo nepovoljno jer se u strujnom krugu nalazi zavojnica (induktivitet armature  $L_a$ ). Da protunapon ne bi oštetio tranzistore, tranzistorima se dodaju protuparalelno spojene diode. Pri isključivanju para tranzistora  $T_1$  i  $T_1'$ , provest će diode  $D_2$  i  $D_2'$  protuparalelno spojene drugom paru tranzistora  $T_2$  i  $T_2'$  (onim koji prije nije bio uključen). Te diode biti će propusno polarizirane za dani smjer struje armature (te će omogućiti nastavak tijeka struje), spajajući pritom armaturu na napon suprotnog polariteta.

Zbog prekidačkog rada pretvarača napon na izlazu (napon armature) je pravokutnog oblika, kako je prikazano na [Slika 6]. Ovaj valni oblik opisuju tri parametra: amplituda (koja je jednaka naponu istosmjernog međukruga  $U_b$ ), frekvencija  $f_{ch}$  (odnosno period  $T = 1/f_{ch}$ ) i tzv. Faktor popunjenosti  $d$  (engl. duty cycle).



**Slika 6.** Valni oblik napona armature za rad u 1. kvad. i periodi uključenosti dioda i tranz.

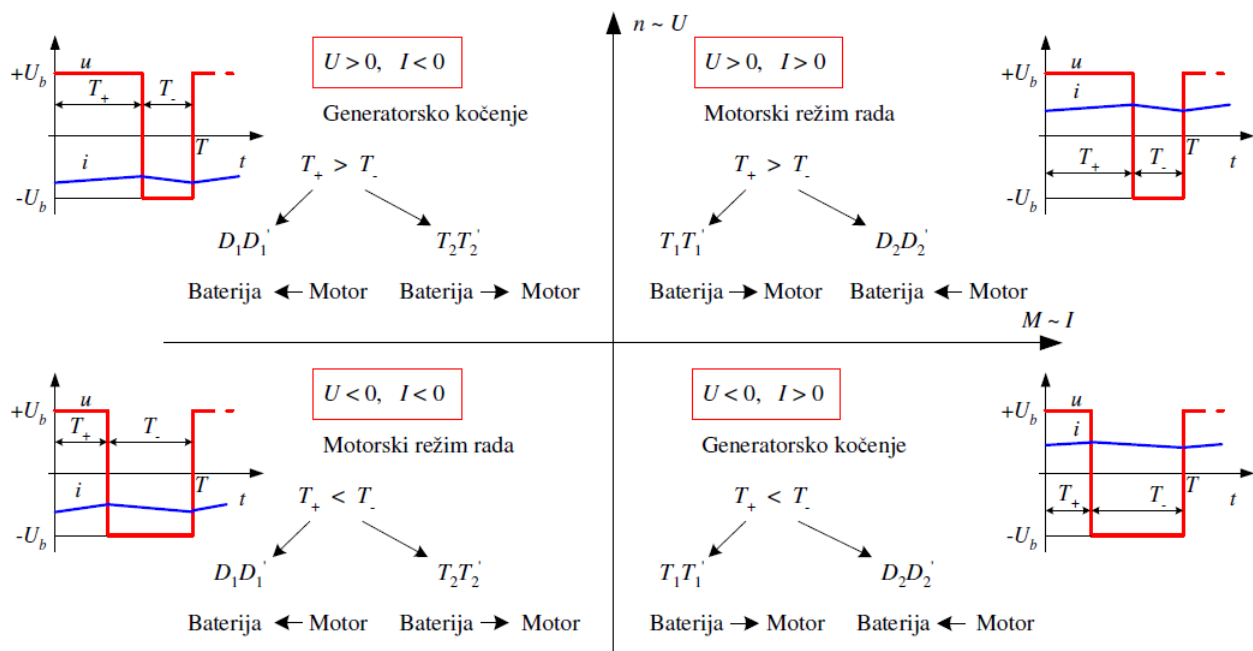
Faktor popunjenosti  $d$  se definira na sljedeći način:

$$d = \frac{T_+}{T} = \frac{T_+}{T_+ + T_-} = 1 - \frac{T_-}{T_+ + T_-} \Leftrightarrow T_+ = dT, \quad T_- = (1 - d)T$$

Srednja vrijednost (DC vrijednost) pravokutnog valnog oblika napona armature računa ovako:

$$U_{sr} = \int_0^T u_{xy}(t) dt = \frac{U_b T_+ - U_b (T - T_+)}{T} = 2U_b \frac{T_+}{T} - U_b = (2d - 1)U_b$$

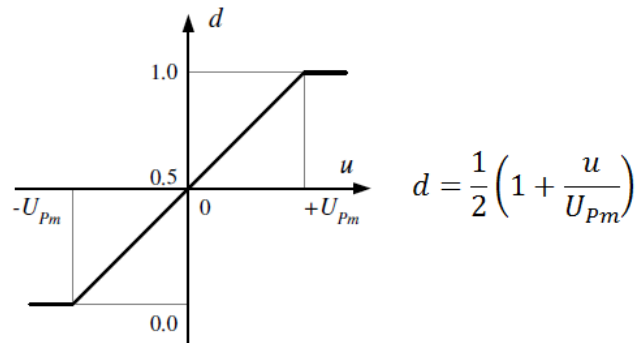
Rad frekvencijskog pretvarača u sva četiri kvadranta ilustriran je na [Slika 7].



**Slika 7.** Shematski prikaz rada frekvencijskog pretvarača u sva četiri kvadranta

Prethodna analiza pokazala je da se promjenom iznosa faktora popunjenosti  $d$  može kontinuirano mijenjati srednja vrijednost napona armature  $U_{sr}$  u rasponu od  $-U_b$  do  $+U_b$ .

Kako uključivanjem i isključivanjem pojedinih tranzistora upravlja PWM sklop, logično je da faktor popunjenosti bude proporcionalan ulaznom naponu PWM sklopa, odnosno referentnom naponu pretvarača kako je prikazano na [Slika 8].



**Slika 8. Ovisnost faktora popunjenosti o referentnom naponu PWM sklopa**

Faktor proporcionalnosti  $K_{ch}$  (pojačanje frekvencijskog pretvarača) računa se kako slijedi:

$$K_{ch} = \frac{\partial U_{sr}}{\partial u} = \frac{\partial U_{sr}}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial u} = \frac{2U_b}{2U_{Pm}}$$

Nadomjesna dinamika (kašnjenje) frekvencijskog pretvarača opisuje se sljedećim nadomjesnim  $PT_1$  članom:

$$G_{ch}(s) = \frac{u_a(s)}{u(s)} = \frac{K_{ch}}{1 + T_{ch}s}, \quad T_{ch} = \frac{1}{f_{ch}}$$

$f_{ch} \rightarrow$  Prekidačka frekvencija (frekvencija prekapčanja) pretvarača

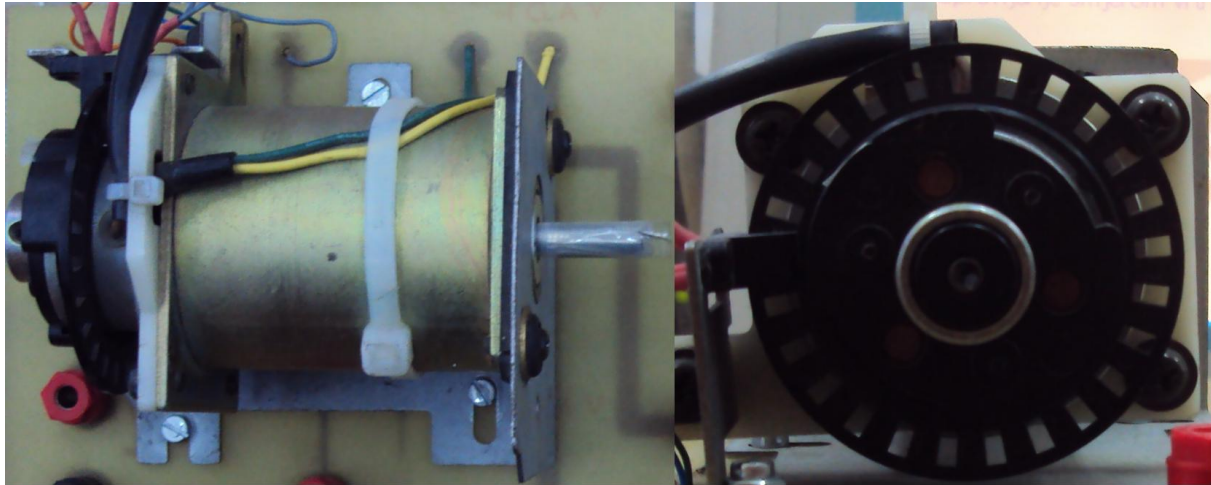
### 2.1.3. Istosmjerni motor s inkrementalnim davačem

Elektromotor je elektromehanički stroj koji pretvara električnu energiju u mehanički rad. Većina elektromotora stvara mehaničku silu interakcijom magnetskog polja i vodljivog materijala. Obrnuti proces, pretvorba mehaničkog rada u električnu energiju, se odvija u generatorima. Neki elektromotori se mogu koristiti i kao generatori. Iako je prvu pretvorbu električne energije u mehanički rad demonstrirao Michael Faraday još 1821. godine, prvi moderni istosmjerni motor (DC motor) koji se uspješno koristio u industriji izumio je Zénobe Gramme 1873. godine.

DC motor je vrsta elektromotora koji koristi istosmjernu struju. Koristili su se za pogon raznih strojeva prije masovne upotrebe izmjenične struje i izmjeničnih motora. Zbog jednostavnosti upravljanja još uvijek imaju široku primjenu u servopogonima malih snaga, te su stoga posebno zanimljivi za edukacijske svrhe.

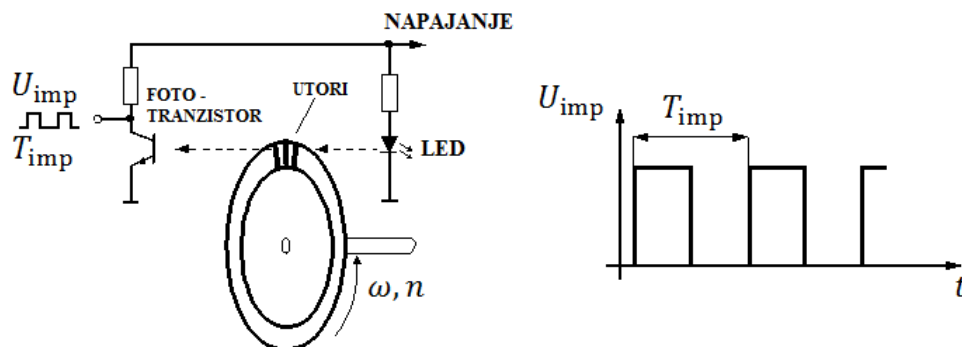


U ovoj maketi se koristi istosmjerni motor male snage (do 50 W) sa permanentnim magnetima kao uzбудom. Na motor je ugrađen inkrementalni davač položaja s kojim se mjeri brzina vrtnje. Na [Slika 9] se vidi motor s inkrementalnim davačem.



Slika 9. DC motor sa inkrementalnim davačem

Sklop davača se sastoji od diska s utorima koji je pričvršćen na vratilo motora i optičkog spreznika (engl opto-coupler) kao što je prikazano na [Slika 10]. Kada svjetlosna zraka prođe kroz utor na disku fototranzistor provede. Kada je fototranzistor zaklonjen, tada ne vodi struju. Ukoliko se disk okreće izmjenjivat će se stanja vođenja i nevođenja tranzistora ovisno o brzini vrtnje, generirajući pritom nizove približno pravokutnih impulsa kako je prikazano na [Slika 10].



Slika 10. Sklop inkrementalnog davača s valnim oblikom na izlazu

Period (frekvencija) pravokutnih impulsa dobivenih na izlazu inkrementalnog davača (fototranzistor) povezan je s brzinom vrtnje motora prema sljedećim izrazima:

$$\omega = \frac{2\pi f_{\text{imp}}}{R_D} = \frac{2\pi}{T_{\text{imp}} R_D} \left[ \frac{\text{rad}}{\text{s}} \right] = \frac{60}{T_{\text{imp}} R_D} \left[ \frac{1}{\text{min}} \right], \quad (*)$$

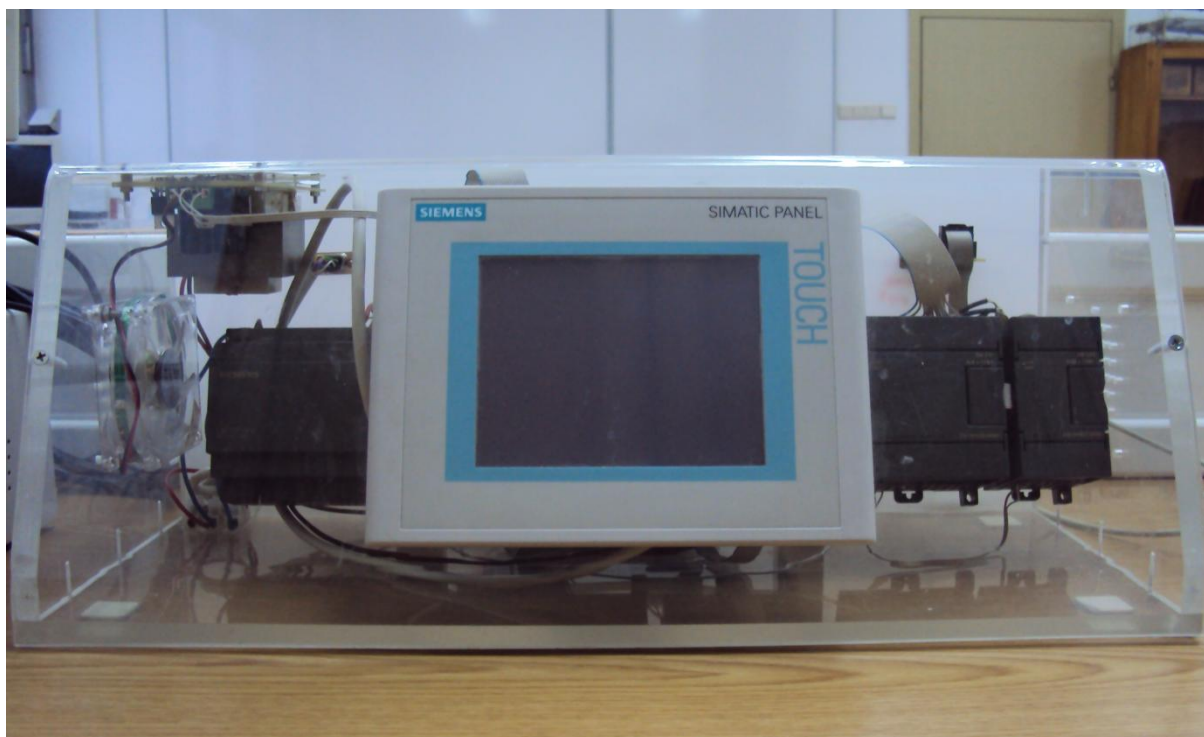
gdje je  $R_D$  rezolucija inkrementalnog davača u [imp./okr]. **Za dani inkrementalni davač položaja rezolucija je 25 imp./okr.**, i taj se podatak kasnije koristi u algoritmu za mjerenje brzine vrtnje unutar PLC-a.

## 2.2. Upravljački dio (PLC)

Programibilni logički kontroler ili PLC (engl. Programmable Logic Controller) je industrijsko računalo koje se koristi za automatizaciju procesa. Sastoji se od memorije, procesora, industrijskih ulaza i izlaza; ulazi nisu tipkovnica i miš, nego tipkala i sklopke, ili razne vrste pretvornika ili senzora. Njegov program, odnosno algoritam, se može jednostavno mijenjati (obično u tzv. Ladder dijagramima). PLC je karakteriziran viskom pouzdanošću, namijenjen je radu u teškim uvjetima, otporan je na vibracije, temperaturne promjene i električne smetnje.

### 2.2.1. PLC kutija Siemens SIMATIC S7-200

S7-200 [Slika 11] je serija programibilnih logičkih kontrolera njemačke tvrtke Siemens koji mogu upravljati širokim spektrom uređaja. Program ovog PLC-a može uključivati Boole-ovu logiku, brojanje, složene matematičke operacije i komunikaciju s drugim inteligentnim napravama. Kompaktan dizajn, fleksibilna konfiguracija i širok izbor naredbi čini S7-200 idealnim izborom za mnoge primjene.



Slika 11. S7-200 u laboratoriju na Katedri za strojarsku automatiku (pogled sprijeda)

PLC S7-200 korišten u ovoj maketi sadrži sljedeće module:

- napajanje LOGO! Power
- S7 CPU jedinica CPU 224
- ekstenzijski modul EM 223 s dodatnim digitalnim ulazima i izlazima
- ekstenzijski modul EM 231 s dodatnim analognim ulazima
- ekstenzijski modul EM 232 s dodatnim analognim izlazima

Također sadrži:

- tekstualni LCD pokaznik TD 200
- tekstualni LCD pokaznik s matricom osjetljivom na dodir TP 070

Tekstualni LCD pokaznici i ekstenzijski moduli EM 223 i EM 231 ne koriste se za realizaciju zadatka, te se neće pomnije opisivati.

### Modul napajanja LOGO! Power

Najčešća primjena LOGO! Power napajanja je za napajanje LOGO! modula (najjednostavnija porodica Siemensovih PLC-a), ali ih je moguće primijeniti i za napajanje drugih trošila (te su u ovom radu odabrani kao izvori napajanja CPU jedinica i ekstenzijskih modula PLC makete). Ističe ga mala osjetljivost na promjenu ulaznog napona (raspon od 85 do 264 V). Modul signalizira ispravan rad pomoću LED diode. Specifikacije modula napajanja navedene su u [Tabela 1]. Modul je prikazan na [Slika 12].

**Tabela 1. Specifikacije modula napajanja LOGO! Power**

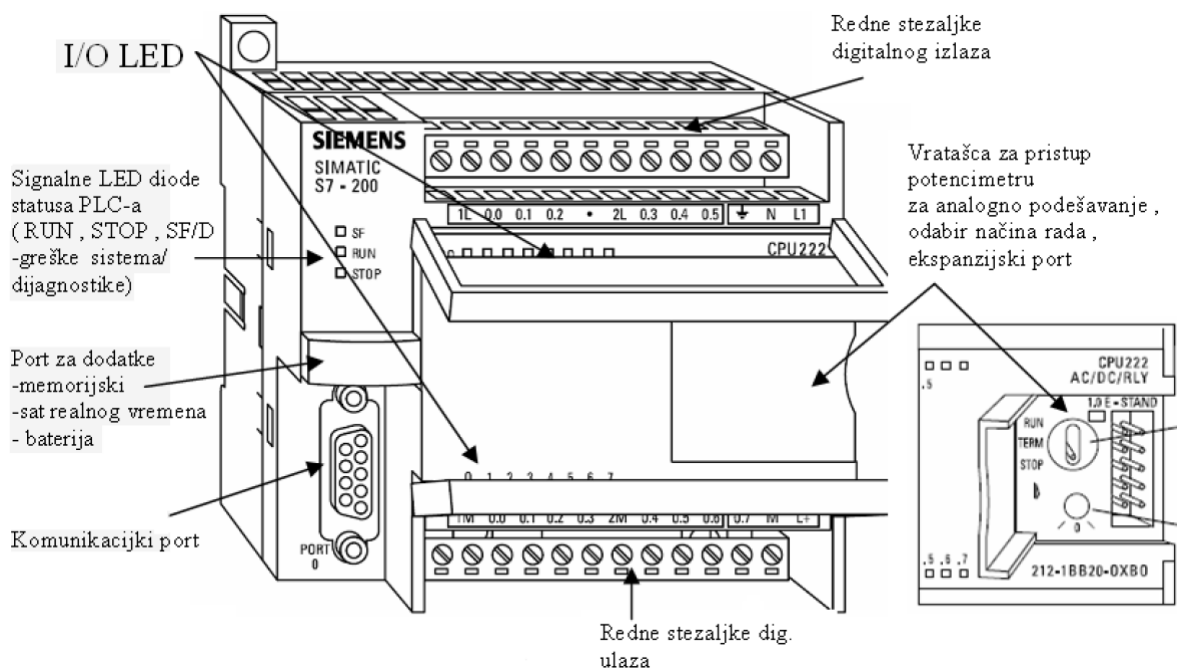
<b>Parametri modula napajanja LOGO!Power [2]</b>	
<b>Veličina</b>	<b>Vrijednosti</b>
ulazni jedno fazni napon	85 do 264 V
izlazni napon (DC)	24 V $\pm$ 3%
izlazna struja	do 4 A
faktor korisnosti	89%
zaštita od kratkog spoja	DA
struja kratkog spoja (DC)	10 A



**Slika 12. Modul napajanja LOGO! Power**

### SIMATIC S7-224 CPU jedinica (CPU 224)

S7-200 CPU u jedinstvenom kućištu sadrži mikrokontroler, sklopove za serijsku komunikaciju, priključke za vanjsko napajanje 24 V DC (ili 230 V AC), te digitalne ulaze i izlaze u tranzistorskoj (optički odvojenoj) izvedbi (24 V DC napajanje), odnosno relejnoj izvedbi (230 V AC napajanje).



**Slika 13. CPU 224**

CPU jedinica prikazana na [Slika 13] sadrži port za komunikaciju (programiranje), signalne LED diode statusa PLC-a (SF/D – greška sistema / dijagnostike; RUN – početak rada; STOP – završetak rada). Na CPU modulu se nalazi memorija (32 kB programske memorije, 64 kB odnosno 256 kB podatkovne memorije), sat realnog vremena, baterija za čuvanje podataka (do 200 sati), sklopka za odabir rada (RUN/ TERM/ STOP) i ekspanzijski port.

Bilo koji PLC, pa prema tome i S7-200 CPU jedinica, ciklički izvršava slijed (sekvencu) instrukcija programa kako je prikazano na [Slika 14]. Jedan puni programski ciklus (naziva se još i „SCAN CYCLE“) sastoji se od sljedećih segmenata (etapa):

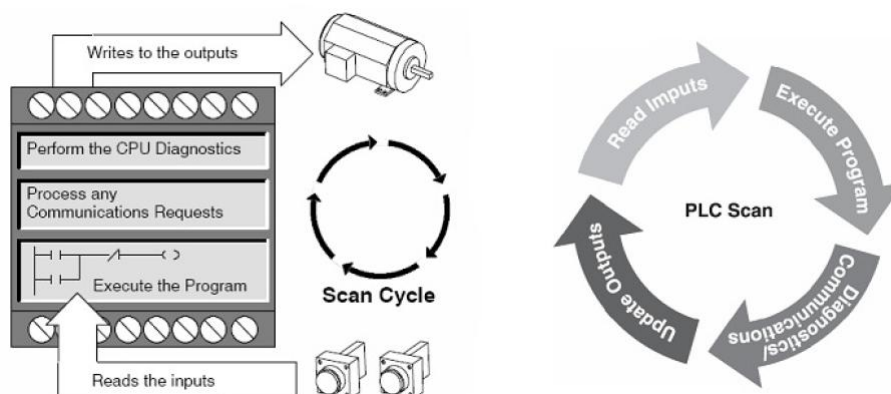
**Čitanje stanja ulaza** - fizička stanja ulaza se kopiraju u registar slike stanja ulaza. Poseban dio memorije radi lakšeg dohvata i konzistentnosti logičkih stanja i analognih mjernih veličina (stanja na fizičkim ulazima se mogu mijenjati u većoj ili manjoj mjeri zbog utjecaja smetnji...).

**Izvršavanje slijeda instrukcija (unutar programa)** - izvršavanje slijeda instrukcija programa i spremanje podataka na odgovarajuće memorijske lokacije (bit memorija, memorija za varijable, ...).

**Procesiranje zahtjeva za komunikaciju** s ostalim uređajima i eventualna uspostava komunikacije ako je to potrebno.

**Dijagnostička provjera** – provjera EPROM-a (firmware-a), memorije i svih ekstenzijskih modula.

**Ispis podataka na izlaze** – vrijednosti koje su bile u drugom koraku pohranjene u registar slike stanja izlaza prosljeđuju se na fizičke izlaze PLC-a S7-200.



**Slika 14. SCAN CYCLE PLC-a S7-200**

Podatkovna memorija PLC-a podijeljena je na 13 područja: I (registar slike digitalnih ulaza), Q (registar slike digitalnih izlaza), V (memorije za varijable, odnosno memorija opće namjene), M (bit memorija, tzv. „markeri“), T (vremenski sklopovi), C (brojila), HC (brza brojila), AC (akumulatori), SM (specijalni programski bit-ovi), L (lokalne varijable), AI (registar slike analognih ulaza), AQ (registar slike analognih izlaza), S (bitovi kontrole sekvenci).

**Registar slike stanja digitalnih ulaza** (Process- Image Input Register „I“) – raspon memorijskih adresa je od I0.0 do I15.7, puni se na početku svakog ciklusa izvršavanja programa PLC-a (logička stanja na digitalnim ulazima preslikavaju se u ovaj registar).

**Registar slike stanja digitalnih izlaza** (Process- Image Output Register „Q“) – raspon memorijskih adresa je od Q0.0 do Q15.7, puni se tijekom izvršavanja programa PLC-a i u zadnjem ciklusu PLC-a se registar preslikava na fizičke digitalne izlaze. Taj registar se inače označava sa O (Output), ali zbog moguće zabune (O/O) uvedena je oznaka „Q“.

**Memorije za varijable** (Variable Memory Area „V“) – raspon memorijskih adresa je od VB0 do VB8191, služi za pohranu međurezultata (dodatne varijable koje nisu tipa bit memorije) i podataka koji se bilježe tijekom izvođenja programa.

**Bit memorija** (Bit Memory Area „M“) – raspon memorijskih adresa je od M0.0 do M31.7, služi za pohranu bit stanja (logičke međurezultate) tijekom izvršavanja programa.

**Područje memorije brojila vremena** (Timer Memory Area „T“) – raspon memorijskih adresa je od T0 do T255, adrese bita memorije ne označavaju samo memorijsku adresu već i vrstu te rezoluciju brojača vremena. Postoje tri tipa brojila vremena (sa kašnjenjem uključivanja, sa kašnjenjem isključivanja i sa kašnjenjem uključivanja i isključivanja), svaki tip brojila može imati tri rezolucije (1 ms, 10 ms, 100 ms). (Detaljnije je obrazloženo u Help-u MicroWIN-a).

**Područje memorije brojila** (Counter Memory Area „C“) – raspon memorijskih adresa je od C0 do C255, postoje tri vrste brojila: brojanje (Up Counter), odbrojanje (Down Counter) i brojanje/odbrojanje (Up/Down Counter), ovo brojilo ovisi o ciklusu PLC-a.

**Brzo brojilo** (High-Speed Counters „HC“) – raspon memorijskih adresa je od HC0 do HC5, broje događaje neovisno o ciklusu PLC-a tj. ako se koristi ulaz Ix.x (pogledati u priručniku PLC-a) promjena na tom ulazu uzrokuje prekid izvršavanja programa i uvećava registar brzog brojača za jedan], služe za brojanje impulsa s inkrementalnog davača pozicije.

**Akumulatori** (Accumulators „AC“) - raspon memorijskih adresa je od AC0 do AC3, služe za upis ili ispis različitih podataka, među-rezultata, a upotrebljavaju se kao memorija. S7-200 sadrži četiri 32 bitna akumulatora (AC0, AC1, AC2, i AC3).

**Specijalna memorija** (Special Memory „SM“) - raspon memorijskih adresa je od SM0.0 do SM549.7, samo čitanje SM0.0 do SM29.7, koristi se za odabir i kontrolu nekih od specijalnih funkcija PLC-a.

**Područje lokalne memorije** (Local Memory Area „L“) - raspon memorijskih adresa je od LB0 do LB63, slična je V memoriji samo što L memorija ima lokalni karakter (doseg), dok V memorija ima globalni karakter (doseg). To znaci da je kod V memorije moguće pristupiti određenoj memorijskoj lokaciji iz bilo kojeg dijela programa (glavnog, potprograma, prekidnih rutina ), dok je lokalna memorija vezana za određeni potprogram.

**Analogni ulazi** (Analog Inputs „AI“) - raspon memorijskih adresa je od AIW0 do AIW62, S7-200 pretvara analognu vrijednost napona ili struje sa odgovarajućeg senzora u digitalnu vrijednost duljine jedne memorijske riječi (W) odnosno u 16 bitni podatak.

**Analogni izlazi** (Analog Outputs „AQ“) - raspon memorijskih adresa je od AQW0 do AQW62, S7- 200 konvertira 16 bitnu digitalnu vrijednost u naponski ili strujni signal (ovisno o načinu spajanja trošila [Slika 18]), u vrijednost proporcionalnu digitalnoj vrijednosti.

**Kontrola sekvence programa** (Sequence Control Relay Memory Area „S“) - raspon memorijskih adresa je od S0.0 do S31.7, koristi se ako neki segmenti programa zahtijevaju slijedno (sekvencijalno) izvršavanje.

Na komunikacijski port se može spojiti programator (PC), odnosno LCD pokaznik. Navedena CPU jedinica S7-224 ima 14 ugrađenih (On-Board) digitalnih ulaza i 10 ugrađenih (On-Board) digitalnih izlaza za prijem (akviziciju) digitalnih signala i digitalno (logičko) upravljanje.



Tabela 2. Opis komunikacijskog port-a modula S7-224

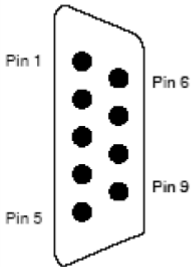
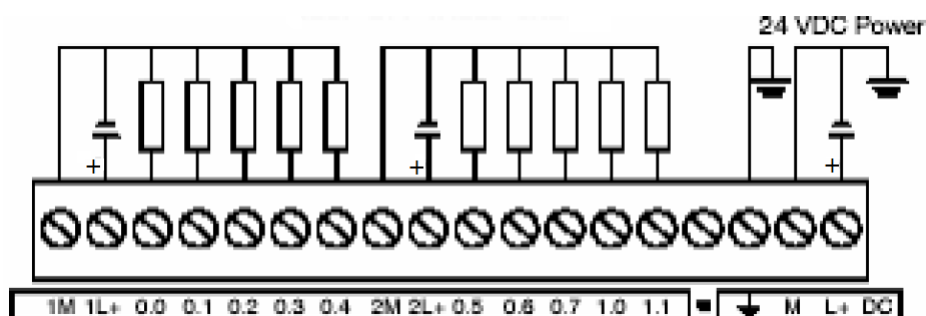
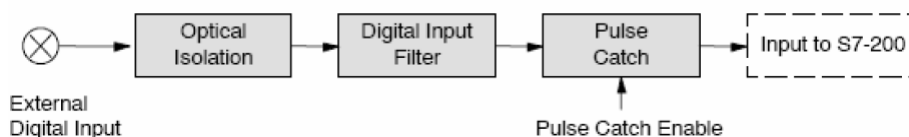
Connector	Pin Number	PROFIBUS Signal	Port 0/Port 1
	1	Shield	Chassis ground
	2	24 V Return	Logic common
	3	RS-485 Signal B	RS-485 Signal B
	4	Request-to-Send	RTS (TTL)
	5	5 V Return	Logic common
	6	+5 V	+5 V, 100 $\Omega$ series resistor
	7	+24 V	+24 V
	8	RS-485 Signal A	RS-485 Signal A
	9	Not applicable	10-bit protocol select (input)
	Connector shell	Shield	Chassis ground

Tabela 3. Specifikacije digitalnih izlaza

Parametri digitalnih izlaznih port-ova	
Veličina	Vrijednosti izlaza za CPU 224
Tip	Solid State-MOSFET1 (Sourcing)
Nazivni napon	24 V
Raspon napona	od 20.4 V do 28.4 V
Probojna (udarna) struja (max.)	8 A na 100 ms
Logička 1(min.)	20 VDC pri maksimalnoj struji
Logička 0 (max.)	0.1 V pri 10 kOhm opterećenju



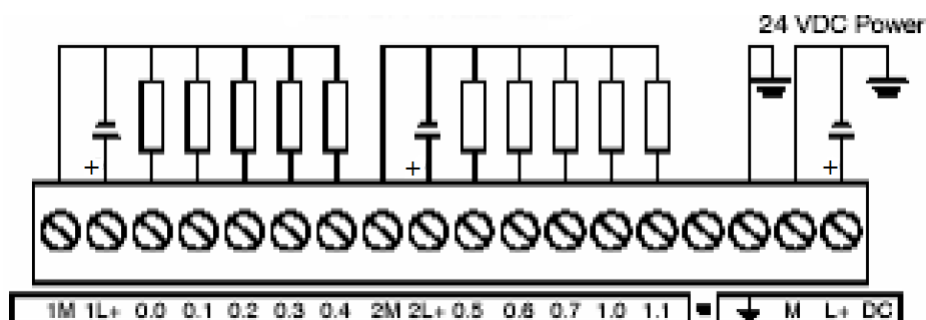
Slika 15. Principna shema spajanja digitalnih izlaza



Slika 16. Digitalni ulazni krug

Tabela 4. Specifikacije digitalnih ulaza

Parametri digitalnih ulaznih port-ova	
Veličina	Vrijednosti ulaza za CPU 224
Tip	sink / source
Nazivni napon	24 V pri 4 mA
Maksimalno dozvoljeni kontinuirani napon	30 V
Probojni napon (max.)	35 V na 0.5 s
Logička 1(min.)	15 V pri 2.5 mA
Logička 0 (max.)	5V pri 1mA



Slika 17. Principna shema spajanja digitalnih ulaza

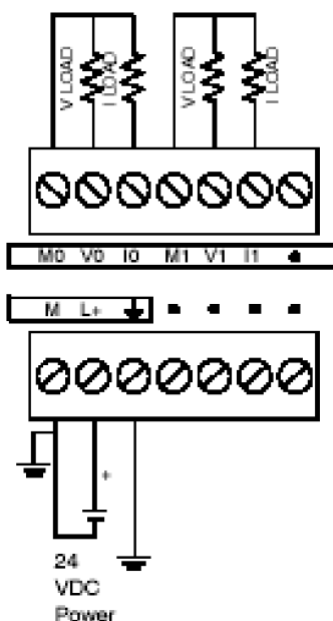


### Ekstenzijski modul EM 232 s 2 analogna izlaza

Analogni izlazni modul pretvara digitalni podatak CPU jedinice u analognu veličinu koja služi za upravljanje izvršnim elementima (aktuatorima) s analognim naponskim ili strujnim ulazom (npr. proporcionalni ventil, energetske pretvornice za upravljanje motorima i slično). Analogni izlazni modul sadrži 12-bitni D/A pretvornik i može se konfigurirati za strujni odnosno naponski izlaz kako je prikazano u [Tabela 5] i [Slika 18].

**Tabela 5. Podaci analognih izlaza modula EM 232**

<b>Parametri analognih izlaznih port-ova</b>	
<b>Veličina</b>	<b>Vrijednosti izlaza za EM 232</b>
Naponski izlaz	$\pm 10 \text{ V}$
Strujni izlaz	$0 - 20 \text{ mA}$



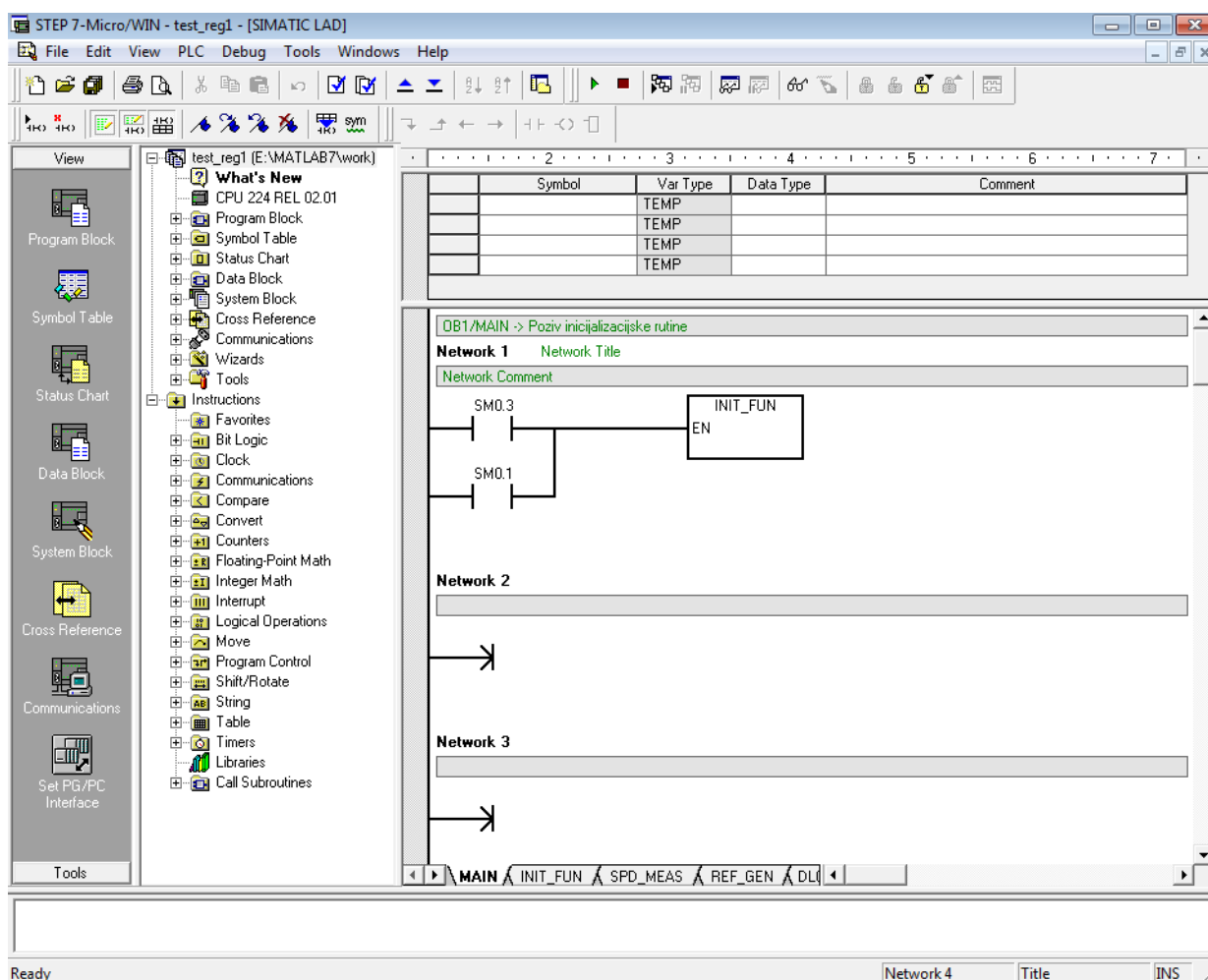
**Slika 18. Principna shema spajanja analognih izlaza modula EM 232**

### **2.2.2. Programsko okruženje STEP 7 MicroWIN**

Softver koji upravlja motorom je pohranjen u PLC-u, a izrađuje se na osobnom računalu u programu „STEP 7 MicroWIN“. Taj se softver istim programom zatim prebacuje na PLC preko PC/PLC PPI kabla.

STEP 7 MicroWIN omogućuje izradu upravljačke logike pomoću Ladder dijagrama. To je oblik programskog jezika koji prikazuje program grafičkim dijagramima poput relejskih električnih shema. Naziva se „Ladder“ (ljestve) dijagram jer izgled ovakvih programa podsjeća na ljestve (sa dvije vertikalne prečke i mnogo dasaka između njih). Na [Slika 19] se vidi sučelje STEP 7 MicroWIN-a.

Program na računalu koji upravlja motorom u ovom radu se naziva „test\_reg1“ i sastoji se od 7 tabova: **MAIN** **INIT\_FUN** **SPD\_MEAS** **REF\_GEN** **DLOG** **PI\_REG** **INTR\_SBR**



Slika 19. „MAIN“ dio Ladder dijagrama u STEP 7 MicroWIN

### Brza brojila (2.2.3)

Ključnu ulogu u regulaciji brzine vrtnje ima tzv. Brzo brojilo (High-speed counter ili HSC). Njihova je svrha precizno brojanje pravokutnih impulsa razmjerno visoke frekvencije (do 30 kHz). Glavno područje primjene brzih brojila je obrada signala s inkrementalnih davača pozicije gdje je broj impulsa sa davača proporcionalan brzini vrtnje elektromotora.

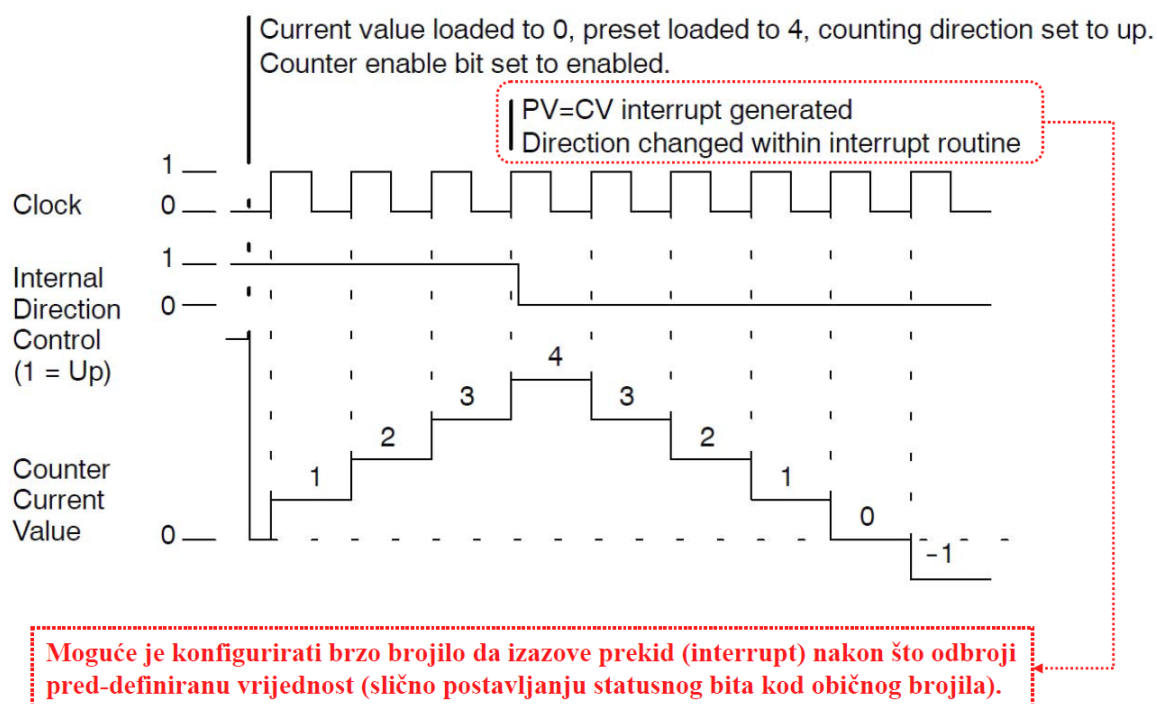
Blokovi za rad s brzim brojilima su HDEF (High-Speed Counter Definition instruction) kojim se definira brzo brojilo i način rada i HSC koji izabire brojilo i pokreće brojanje.

Na [Tabela 6] se vide raspoloživa brojila i načini rada (mode).

Tabela 6. Raspoloživa brojila i načini rada (mode)

Mode	Description	Inputs			
		HSC0	I0.0	I0.1	I0.2
		HSC1	I0.6	I0.7	I1.0
		HSC2	I1.2	I1.3	I1.4
		HSC3	I0.1		
		HSC4	I0.3	I0.4	I0.5
		HSC5	I0.4		
0	Single-phase counter with internal direction control	Clock			
1		Clock		Reset	
2		Clock		Reset	Start
3	Single-phase counter with external direction control	Clock	Direction		
4		Clock	Direction	Reset	
5		Clock	Direction	Reset	Start
6	Two-phase counter with 2 clock inputs	Clock Up	Clock Down		
7		Clock Up	Clock Down	Reset	
8		Clock Up	Clock Down	Reset	Start
9	A/B phase quadrature counter	Clock A	Clock B		
10		Clock A	Clock B	Reset	
11		Clock A	Clock B	Reset	Start
12	Only HSC0 and HSC3 support mode12. HSC0 counts the number of pulses going out of Q0.0. HSC3 counts the number of pulses going out of Q0.1.				

Kao što se vidi na [Tabela 6] raspolaže se sa šest Brza brojila od HSC0 do HSC5 te sa 0 do 12 načina rada. U ovome radu koristi se brojilo „HSC1“ koje se postavlja za rad u modu „0“. Način rada moda „0“ je prikazan na [Slika 20].



Slika 20. Način rada „0“: jednofazno brojilo s internim upravljanjem smjerom brojanja

Brzim brojiлом se upravlja na sljedeći način:

Kada se aktivira *reset* ulaz, briše se trenutna vrijednost u brojiu i brojilo ostaje bez vrijednosti dok se ne deaktivira *reset*.

Kada se aktivira *start* ulaz, onda je brojiu omogućeno da broji. Kada je *start* deaktiviran, trenutna vrijednost brojila se drži konstantom unatoč nadolazećim impulsima (clock).

Ako se *reset* aktivira dok je *start* deaktiviran, *reset* se ignorira i trenutna vrijednost u brojiu se ne mijenja. Ako *start* postane aktivan dok je *reset* aktivan, trenutna vrijednost se briše.

Na [Tabele 7, 8, 9 i 10] su prikazani važni podaci za upravljanje brojiu.

**Tabela 7. Kontrolni bitovi (SMB 47)**

HSC0	HSC1	HSC2	HSC4	Description (used only when HDEF is executed)		
SM37.0	SM47.0	SM57.0	SM147.0	Active level control bit for Reset <sup>1</sup> : 0 = Reset is active high      1 = Reset is active low		
---	SM47.1	SM57.1	---	Active level control bit for Start <sup>1</sup> : 0 = Start is active high      1 = Start is active low		
SM37.2	SM47.2	SM57.2	SM147.2	Counting rate selection for quadrature counters: 0 = 4X counting rate      1 = 1X counting rate		
1 The default setting of the reset input and the start input are active high, and the quadrature counting rate is 4x (or four times the input clock frequency).						
HSC0	HSC1	HSC2	HSC3	HSC4	HSC5	Description
SM37.3	SM47.3	SM57.3	SM137.3	SM147.3	SM157.3	Counting direction control bit: 0 = Count down      1 = Count up
SM37.4	SM47.4	SM57.4	SM137.4	SM147.4	SM157.4	Write the counting direction to the HSC: 0 = No update      1 = Update direction
SM37.5	SM47.5	SM57.5	SM137.5	SM147.5	SM157.5	Write the new preset value to the HSC: 0 = No update      1 = Update preset
SM37.6	SM47.6	SM57.6	SM137.6	SM147.6	SM157.6	Write the new current value to the HSC: 0 = No update      1 = Update current value
SM37.7	SM47.7	SM57.7	SM137.7	SM147.7	SM157.7	Enable the HSC: 0 = Disable the HSC      1 = Enable the HSC

**Tabela 8. Postavljanje početne vrijednosti i postavne (preset) vrijednosti**

Value to be Loaded	HSC0	HSC1	HSC2	HSC3	HSC4	HSC5
New current value	SMD38	SMD48	SMD58	SMD138	SMD148	SMD158
New preset value	SMD42	SMD52	SMD62	SMD142	SMD152	SMD162

**Tabela 9. Adrese trenutnih vrijednosti brojanja (32-bitni registri).**

Value	HSC0	HSC1	HSC2	HSC3	HSC4	HSC5
Current value	HC0	HC1	HC2	HC3	HC4	HC5

**Tabela 10. Statusni bitovi (read-only) brzih brojila**

HSC0	HSC1	HSC2	HSC3	HSC4	HSC5	Description
SM36.0	SM46.0	SM56.0	SM136.0	SM146.0	SM156.0	Not used
SM36.1	SM46.1	SM56.1	SM136.1	SM146.1	SM156.1	Not used
SM36.2	SM46.2	SM56.2	SM136.2	SM146.2	SM156.2	Not used
SM36.3	SM46.3	SM56.3	SM136.3	SM146.3	SM156.3	Not used
SM36.4	SM46.4	SM56.4	SM136.4	SM146.4	SM156.4	Not used
SM36.5	SM46.5	SM56.5	SM136.5	SM146.5	SM156.5	Current counting direction status bit: 0 = Counting down 1 = Counting up
SM36.6	SM46.6	SM56.6	SM136.6	SM146.6	SM156.6	Current value equals preset value status bit: 0 = Not equal 1 = Equal
SM36.7	SM46.7	SM56.7	SM136.7	SM146.7	SM156.7	Current value greater than preset value status bit: 0 = Less than or equal 1 = Greater than

Za konfiguriranje brojila moguće je koristiti *HSC Instruction Wizard*, pri čemu je potrebno definirati sljedeće parametre brojila:

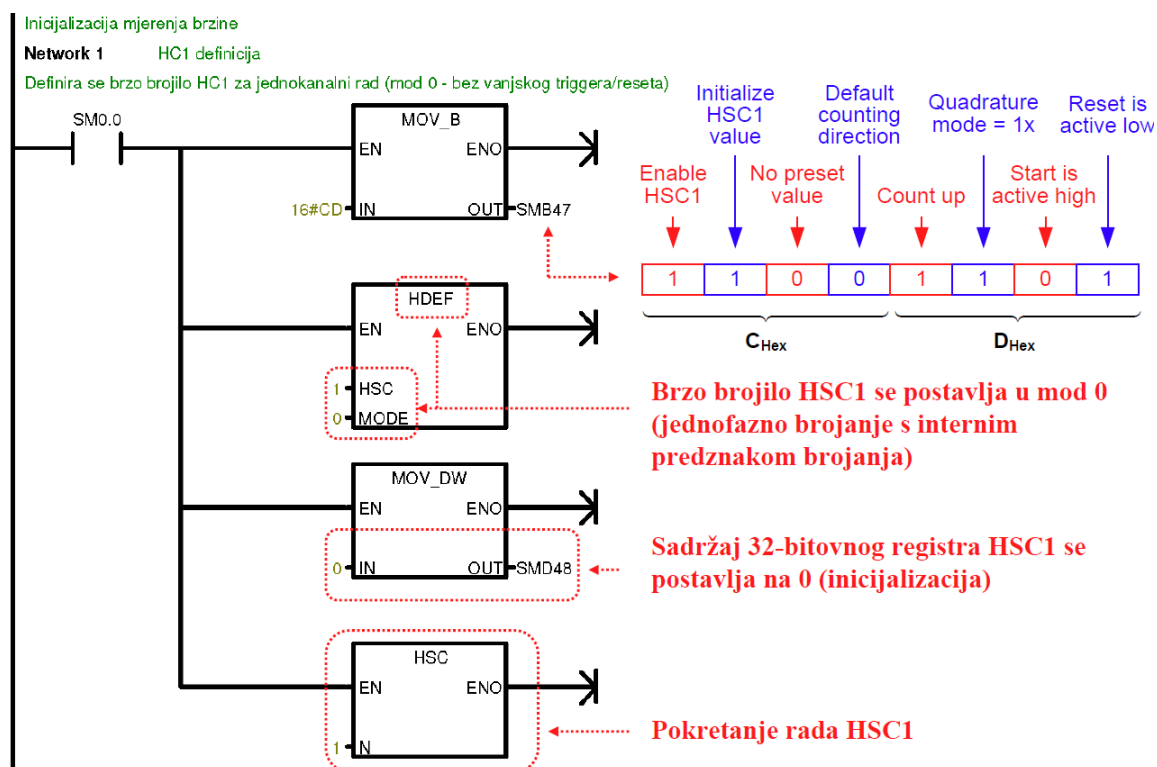
- brojilo (0 ... 5) i način rada (mode 0 ... 12),
- postavna (preset) vrijednost brojila za okidanje interrupta,
- trenutnu vrijednost 32-bitnog registra brojila,
- početni smjer brojanja.

Ručno podešavanje brojila zahtijeva sljedeće korake:

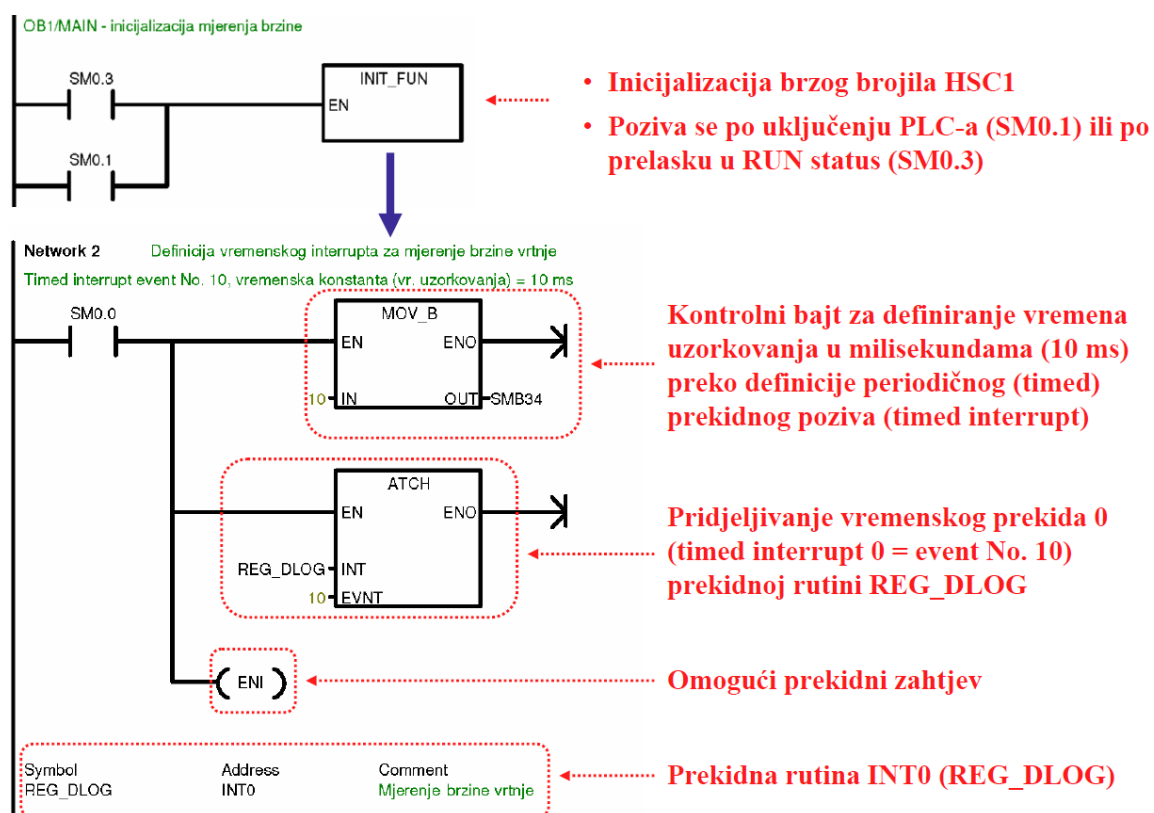
- definiranje brojila (0 ... 5) i način rada (mode 0 ... 12),
- postavljanje vrijednosti kontrolnog bajta (u SMB memoriji),
- postavljanje početne vrijednosti,
- upisivanje *preset* vrijednosti brojanja (za okidanje *interrupt-a*),
- definiranje prekidne rutine za rukovanje *interrupt* zahtjevom,
- pokretanje brojanja.

Na [Slikama 21-24] prikazani su dijelovi programa za:

- inicijalizaciju brojila [Slika 21],
- inicijalizaciju prekidne rutine za čitanje sadržaja brojila [Slika 22],
- potprogram za čitanje sadržaja brojila i računanje brzine vrtnje motora [Slika 23] i [Slika 24] prema izrazu (\*)

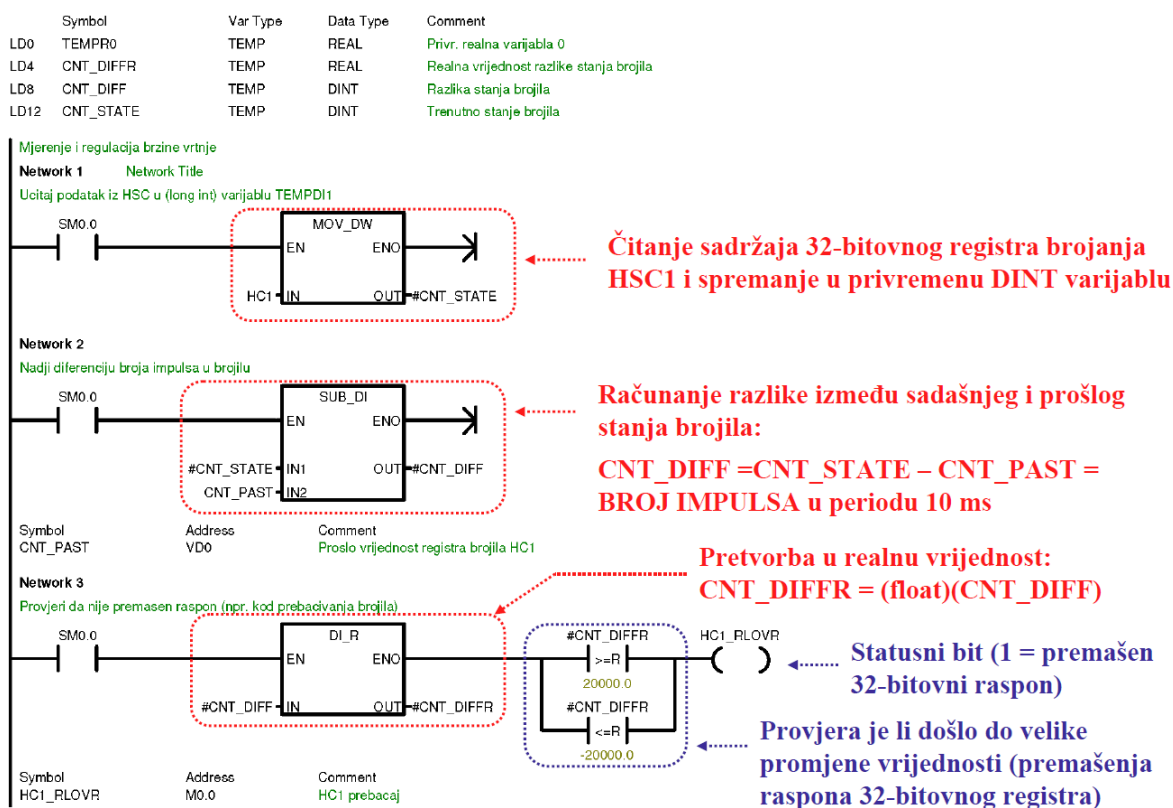


Slika 21. Tab „INIT\_FUN“: Pokretanje i inicijalizacija Brzog brojila

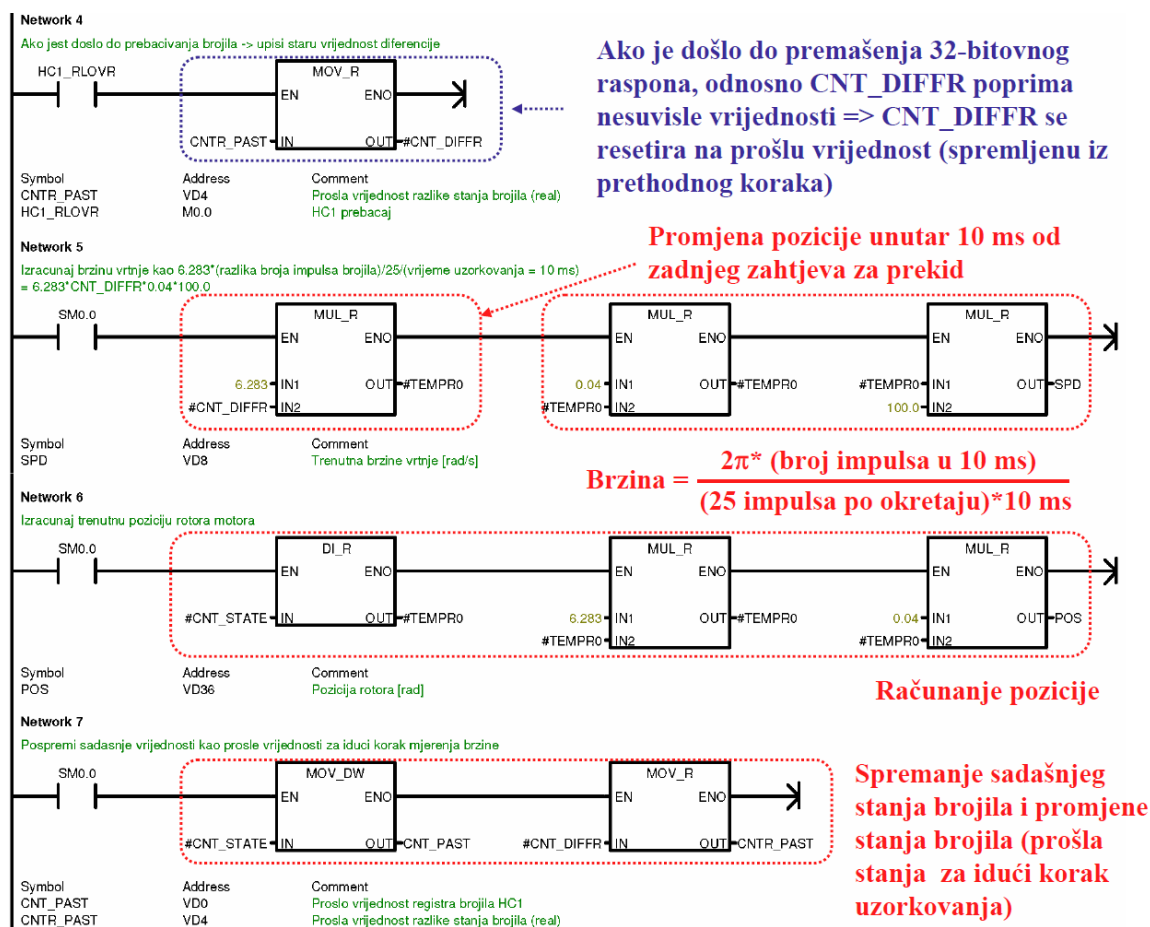


Slika 22. Tabovi „MAIN“ i „INIT\_FUN“: Mjerenje brzine vrtnje





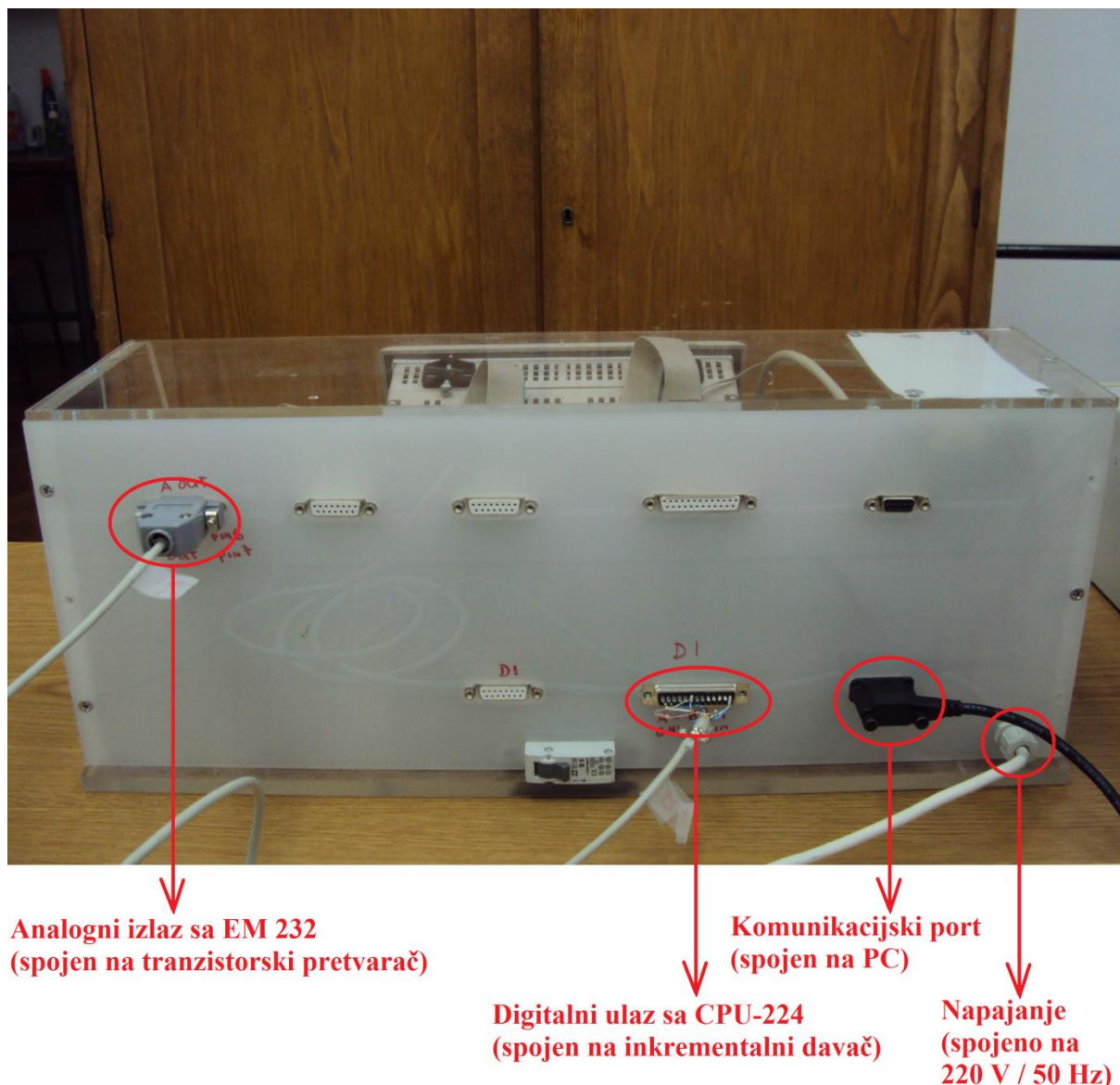
Slika 23. Tab „SPD\_MEAS“



Slika 24. Tab „SPD\_MEAS“ (nastavak)

### 2.3. Ožičenje laboratorijske makete

Na [Slika 25] je prikazan izgled PLC kutije kada je cijela maketa spojena i spremna za rad.



Slika 25. Stražnja strana PLC kutije spojena s ostatkom makete

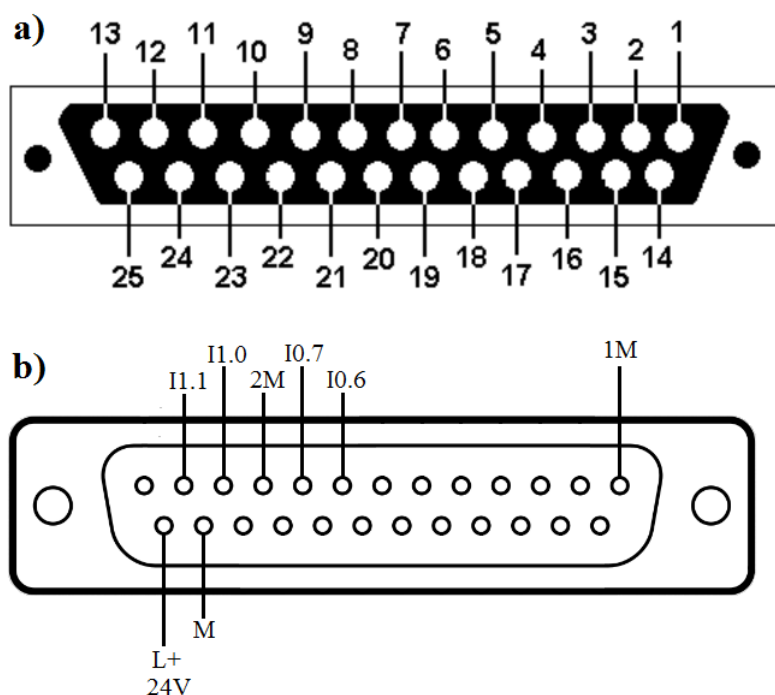
Na CPU jedinicu PLC-a se spajaju tri konektora, a to su DB-9-1, DB-25-1 i DB-25-2 gdje se DB-9-1 koristi za komunikaciju sa „host“ PC-om, DB-15-4 za spajanje analognih izlaza, a DB-25-2 za spajanje signala s inkrementalnog davača. Konektor DB-25-2 spaja digitalne ulaze CPU-a sa stražnjom stranom PLC kutije kako je prikazano na [Tabela 11].



Tabela 11. Spoj konektora DB-25-2 s digitalnim ulazima na CPU-224

DB-25-2 spojen na CPU-224			
DB-25-2 Pin	CPU-224 Port	DB-25-2 Pin	CPU-224 Port
1	1M	14	I1.3
2	I0.0	15	I1.4
3	I0.1	16	I1.5
4	I0.2	17	
5	I0.3	18	
6	I0.4	19	
7	I0.5	20	
8	I0.6	21	
9	I0.7	22	
10	2M	23	
11	I1.0	24	M
12	I1.1	25	L+
13	I1.2		

Na [Slika 26] su brojevima označeni pinovi konektora DB-25-2 i ucrtani su pinovi koji se koriste u ovoj maketi. **a)** Pinovi konektora označeni brojevima. **b)** Pinovi konektora koji su spojeni s ostatkom makete. Treba napomenuti da se od ucrtanih ulaza u ovome radu koristi samo I0.6 jer se u PLC-u koristi Brzo brojilo HSC1 u načinu rada „0“. Taj način rada je jednokanalni gdje I0.6 predstavlja *clock* pa ostali ulazi nisu potrebni.



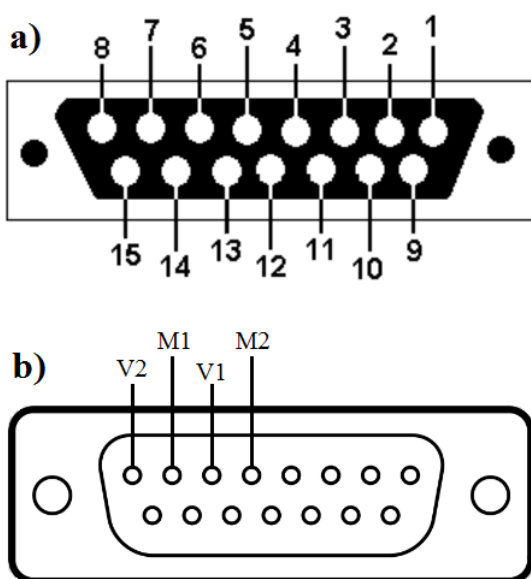
Slika 26. Konektor DB-25-2

Drugi konektor je DB-15-4 koji spaja analogne izlaze modula EM 232 sa stražnjom stranom PLC kutije. Na [Tabela 12] je prikazan ovaj spoj.

**Tabela 12. Spoj konektora DB-15-4 s digitalnim ulazima na EM 232**

DB-15-4 spojen na EM 232			
DB-15-4 Pin	EM 232 Port	DB-15-4 Pin	EM 232 Port
1		9	
2		10	
3		11	
4		12	
5	V2	13	
6	M1 (GND)	14	
7	V1	15	
8	M2 (GND)		

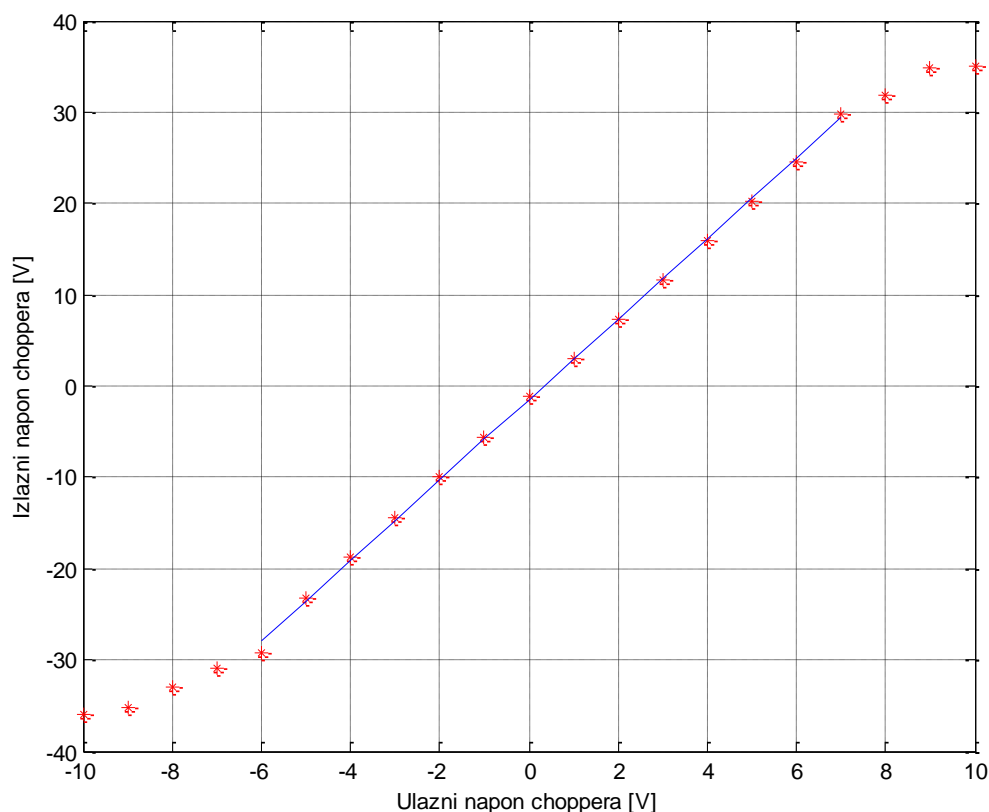
Na [Slika 27] su brojevima označeni pinovi konektora DB-15-4 i ucrtani su pinovi koji se koriste u ovoj maketi. **a)** Pinovi konektora označeni brojevima. **b)** Pinovi konektora koji su spojeni s ostatkom makete. Od ucrtanih analognih izlaza koristi se samo V1.



**Slika 27. Konektor DB-15-4**

### 3. SNIMANJE KARAKTERISTIKE TRANZISTORSKOG PRETVARAČA

U sklopu ovog rada u laboratoriju je izmjerena karakteristika tranzistorskog pretvarača. Ona prikazuje izlazni napon tranzistorskog pretvarača u odnosu na ulazni. Referentni napon tranzistorskom mostu daje analogni izlaz PLC-a koji se može kretati u rasponu od -10 V do +10 V. Tim naponom se može upravljati preko PC-a/PLC-a u prethodno predstavljenom programu STEP 7 MicroWIN. Karakteristika je prikazana na [Slika 29].



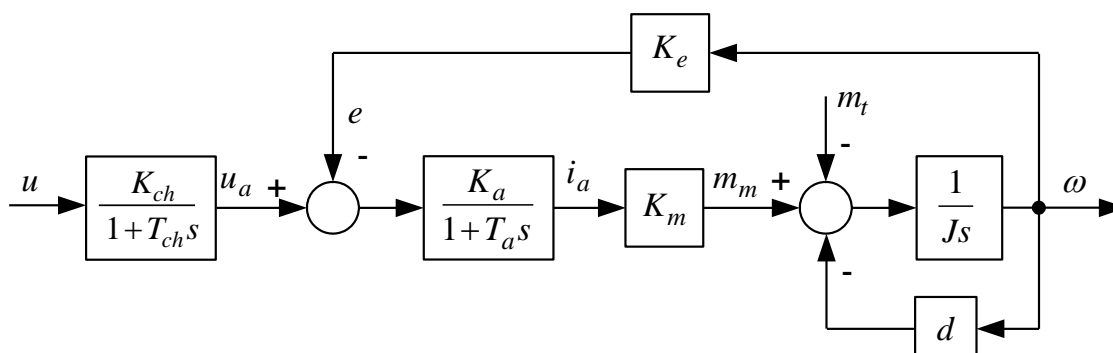
**Slika 28. Karakteristika tranzistorskog pretvarača (choppera)**

Iz karakteristike se vidi da je odnos izlaz/ulaz linearan u području ulaznog napona od -6 V do +6 V tako da je motor upravljiv u tom području.

#### 4. REGULACIJA BRZINE VRTNJE DC MOTORA PI REGULATOROM

Mali istosmjerni DC motori poput korištenog u maketi su u pravilu karakterizirani razmjerno velikim iznosom otpora armature, uslijed čega imaju razmjerno male struje kratkog spoja i male iznose armaturne vremenske konstante  $T_a$  (može se zanemariti). Dodatno, prilikom razvoja tiskane pločice pretvarača i preliminarnih testova utvrđeno je da integrirani (otpornički) senzor struje ne radi pouzdano, te taj signal nije korišten u regulaciji motora. Zbog toga u ovoj maketi nije realizirana kaskadna struktura regulacije vrtnje gdje bi nadređeni regulator brzine vrtnje zadavao referencu struje podređenom regulatoru struje.

Za ovu maketu je realiziran izravni regulator brzine vrtnje koji izravno zadaje referentnu vrijednost napona armature motora. Kako se PI regulator treba implementirati u PLC-u, potrebno je uzeti u obzir ekvivalentno kašnjenje mjerenja brzine vrtnje s inkrementalnog davača impulsa, te utjecaj efekta uzorkovanja i D/A pretvorbe.



**Slika 29.** Potpuni dinamički model DC motora s tranzistorskim pretvaračem

Na [Slika 29] prikazan je model DC motora opremljen frekvencijskim pretvaračem. Ovaj model se može dodatno pojednostaviti uzimajući u obzir sljedeće realne pretpostavke:

- Mali iznos armaturne vremenske konst.  $T_a$ , što je karakteristično za motore malih snaga,
- Mali iznos nadomjesne vremenske konst. pretvarača  $T_{ch}$  ( $f_{ch} = 4$  KHz u ovom radu),
- Viskozno trenje (faktor  $d$ ) u modelu je malog iznosa.

Polazi se od prijenosne funkcije modela motora na [Slika 29]:

$$G_{\omega}(s) = \frac{\omega(s)}{u(s)} = \frac{\frac{K_{ch}}{K_e} \left(1 + \frac{b}{K_a K_e K_m}\right)^{-1}}{(1 + T_{ch}s) \left(1 + \frac{J + T_a b}{b + K_a K_e K_m} s + \frac{T_a J}{b + K_a K_e K_m} s^2\right)}.$$

Zanemarenjem članova višeg reda i viskoznog trenja dobije se sljedeći model motora [3]:

$$G_{\omega}(s) = \frac{\omega(s)}{u(s)} \approx \frac{K_p}{(1 + T_{par}s)(1 + T_{em}s)}$$

gdje su

$$K_p = \frac{K_{ch}}{K_e} \left( 1 + \frac{b}{K_a K_e K_m} \right)^{-1} \approx \frac{K_{ch}}{K_e}$$

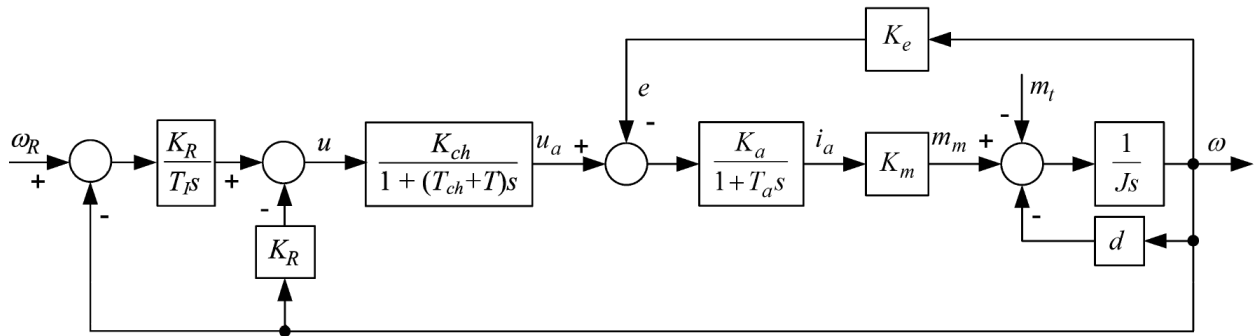
$$T_{par} = T_a + T_{ch},$$

$$T_{em} = \frac{J + T_a b}{b + K_a K_e K_m} \approx \frac{J}{K_a K_e K_m}$$

Dobiveni model se kasnije koristi u postupku projektiranja regulacijskog sustava, odnosno kao osnova za podešavanje parametara regulatora primjenom kriterija optimuma dvostrukog odnosa (vidi naredna potpoglavlja).

#### 4.1. Projektiranje regulatora

Na [Slika 30] je prikazan model motora s PI regulatorom.



**Slika 30.** Ekvivalentni vremensko-kontinuirani regulacijski krug brzine vrtnje s PI reg.

Vladanje oscilatornog člana 2. reda s relativnim koeficijento prigušenja  $\zeta = 0.707$  smatra se optimalnim u mnogim područjima regulacijske tehnike. Za razliku od oscilatornog člana 2. reda, kod koje je veza između pokazatelja i vladanja u vremenskoj domeni i položaja polova i nula u kompleksnom području egzaktna, kod članova većeg reda nije. Pomoću optimuma dvostrukog odnosa može se odrediti odziv sustava u odnosu na prijenosnu funkciju zatvorenog kruga regulacije. Prijenosna funkcija zatvorenog sustava prema optimumu dvostrukog odnosa je:

$$G_{odo} = \frac{1}{A(s)} = \frac{1}{1 + T_e s + D_2 T_e^2 s^2 + \dots + D_{n-1} D_{n-2}^2 \dots D_2^{n-2} T_e^{n-1} s^{n-1} + D_n D_{n-1}^2 \dots D_2^{n-1} T_e^n s^n}$$

gdje su:

$T_e$  - ekvivalentna vremenska konstanta

$D_i$  - karakteristični odnosi ( $i = 2, 3 \dots n$ )

$n$  – red prijenosne funkcije zatvorenog sustava

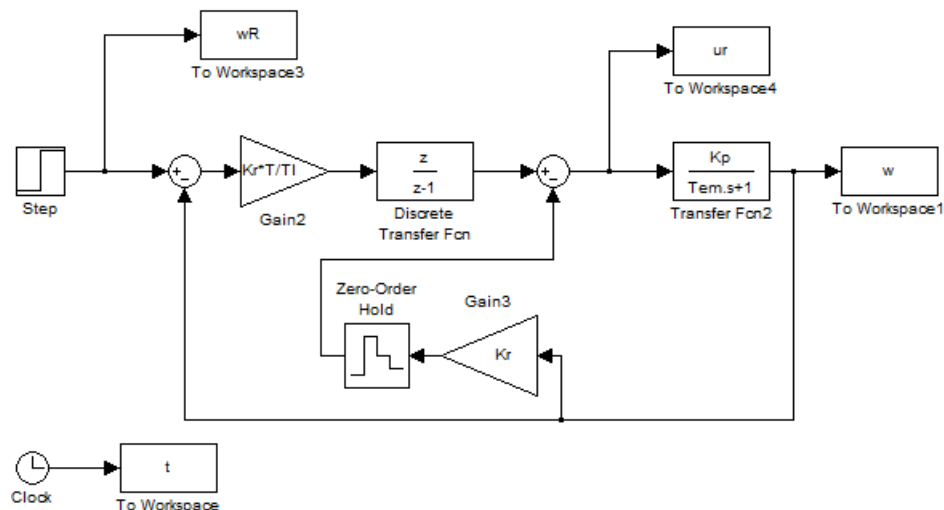
Pomoću karakterističnih odnosa  $D_i$  određuje se prigušenje odziva. Postavljanjem svih karakterističnih odnosa na optimalni iznos  $D_2 = D_3 = D_n$  postiže se tzv. kvazi-aperiodski odziv regulacijskog kruga sa 6% nadvišenja u odzivu (što odgovara vladanju oscilatornog člana 2. reda s faktorom prigušenja  $\zeta = 0.707$ , te vremenu porasta  $t_{100\%} \approx 1.8T_e$ ). Sinteza regulacijskog sustava provodi se izjednačavanjem karakterističnog polinoma prijenosne funkcije zatvorenog regulacijskog kruga s karakterističnim polinomom dvostrukog odnosa  $A(s)$ .

S obzirom da je za izračun parametara regulatora potreban iznos elektromehaničke vremenske konstante  $T_{em}$  i iznos pojačanja procesa  $K_p$  koji se određuju eksperimentalno, daljnji proračun PI regulatora je nastavljen u poglavlju 5.

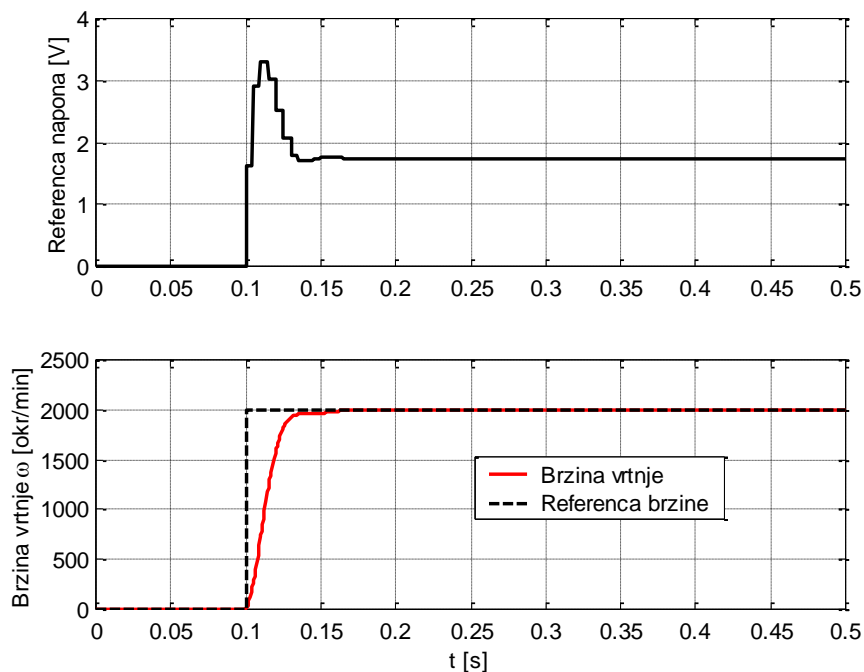
#### 4.2. Simulacija sustava u Simulink-u

Prije puštanja u rad, sustav je simuliran u programskom paketu „Simulink“. Simulacije su rađene za drugi motor koji je sličan ovome u maketi, a cilj simulacija je testirati koncept PI regulatora.

Prvo je simuliran sustav bez kvantizacije signala brzine vrtnje. Simulacijski model "sim\_md1.mdl" koji se poziva je prikazan na [Slika 31]. Rezultati simulacije su prikazani na [Slika 32].



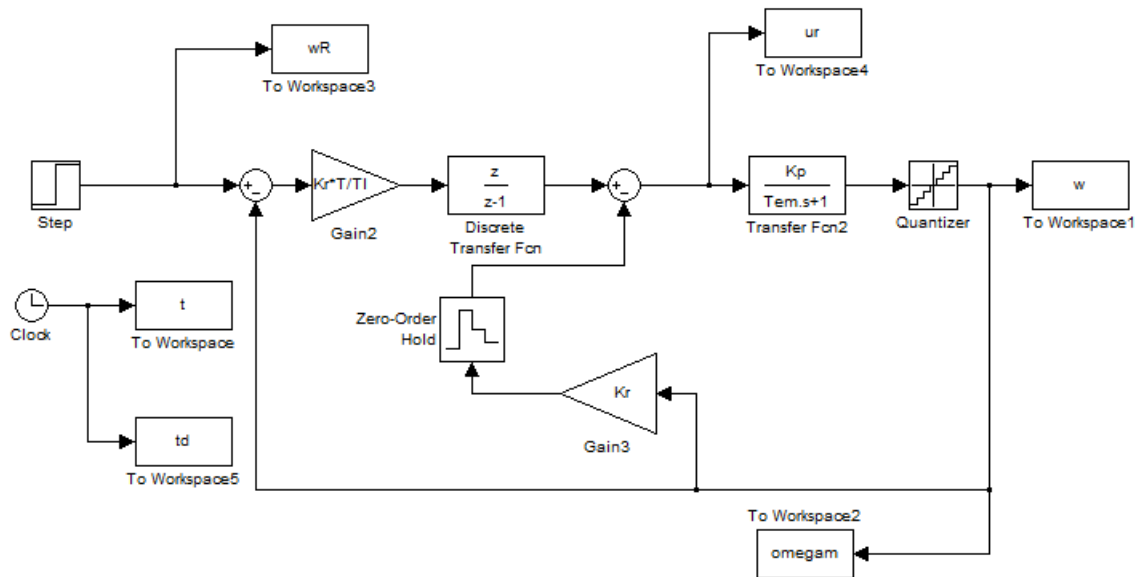
Slika 31. Simulacijski model „sim\_md1.mdl“



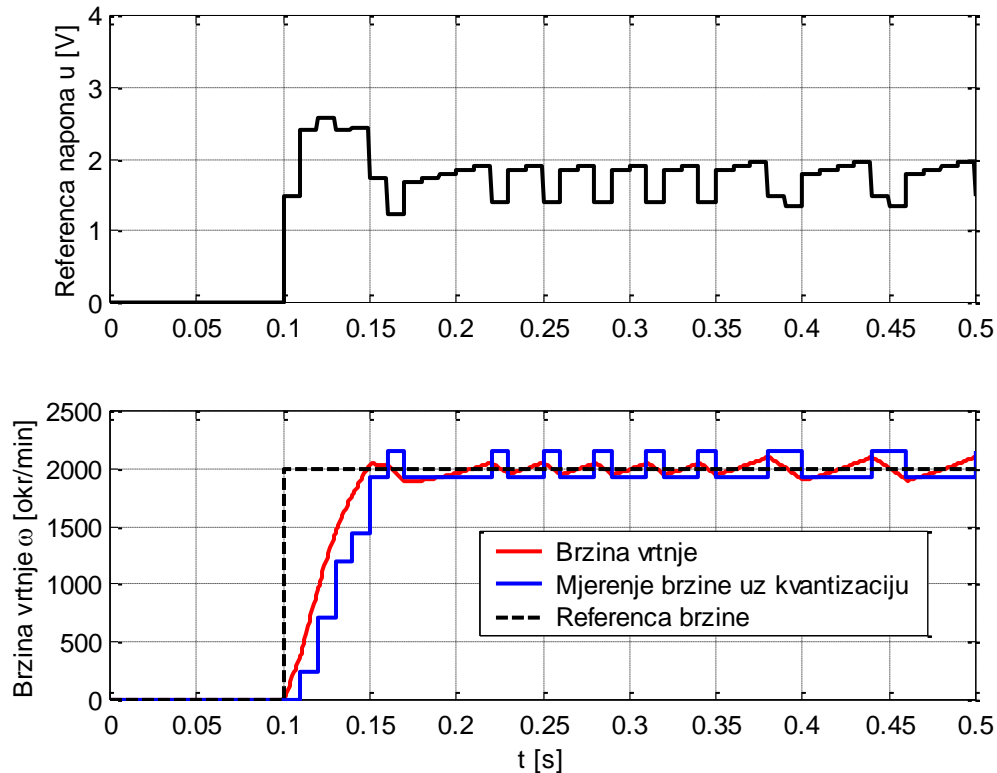
Slika 32. Rezultati simulacije (bez kvantizacije)

Iz rezultata simulacije se vidi da je sustav stabilan sa dovoljno brzim aperiodskim odzivom.

Zatim je simuliran sustav s kvantizacijom signala brzine vrtnje pokretanjem simulacijskog modela “sim\_md13.mdl”. Taj model ja prikazan na [Slika 33]. Rezultati simulacije su prikazani na [Slika 34].



Slika 33. Simulacijski model “sim\_md13.mdl”



Slika 34. Rezultati simulacije (sa kvantizacijom)

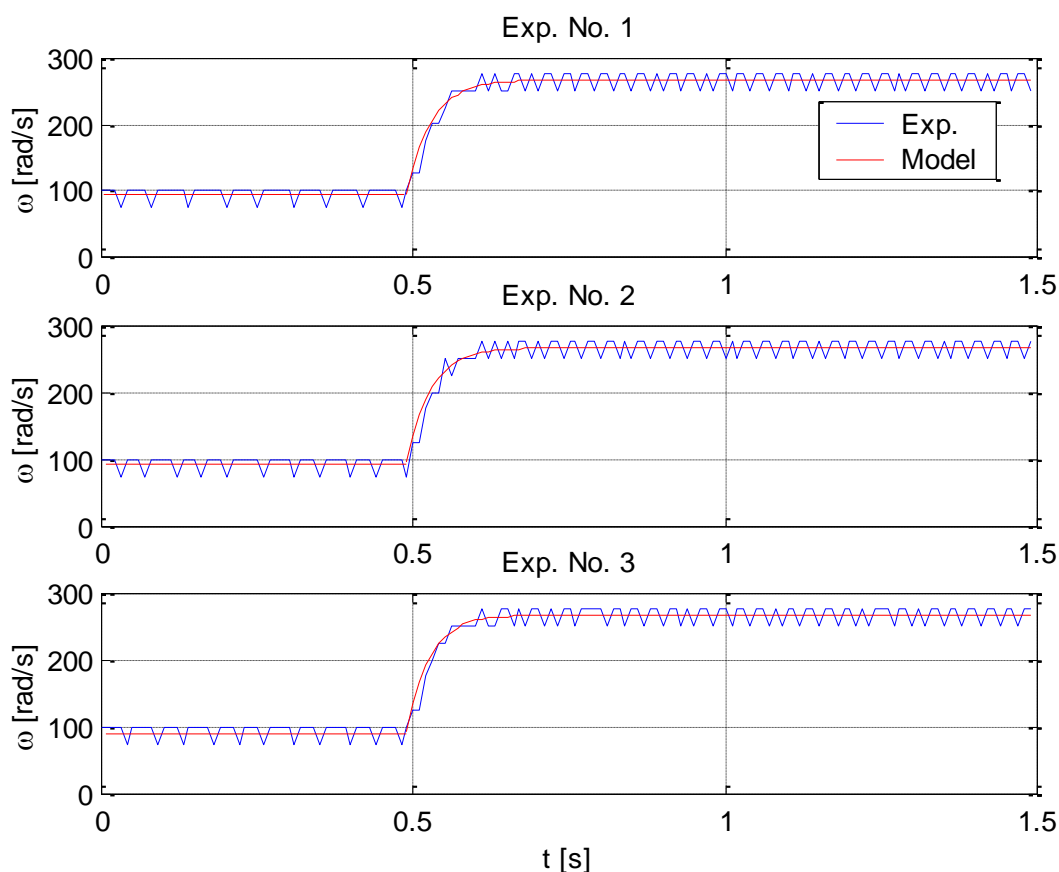


## 5. EKSPERIMENTALNI REZULTATI

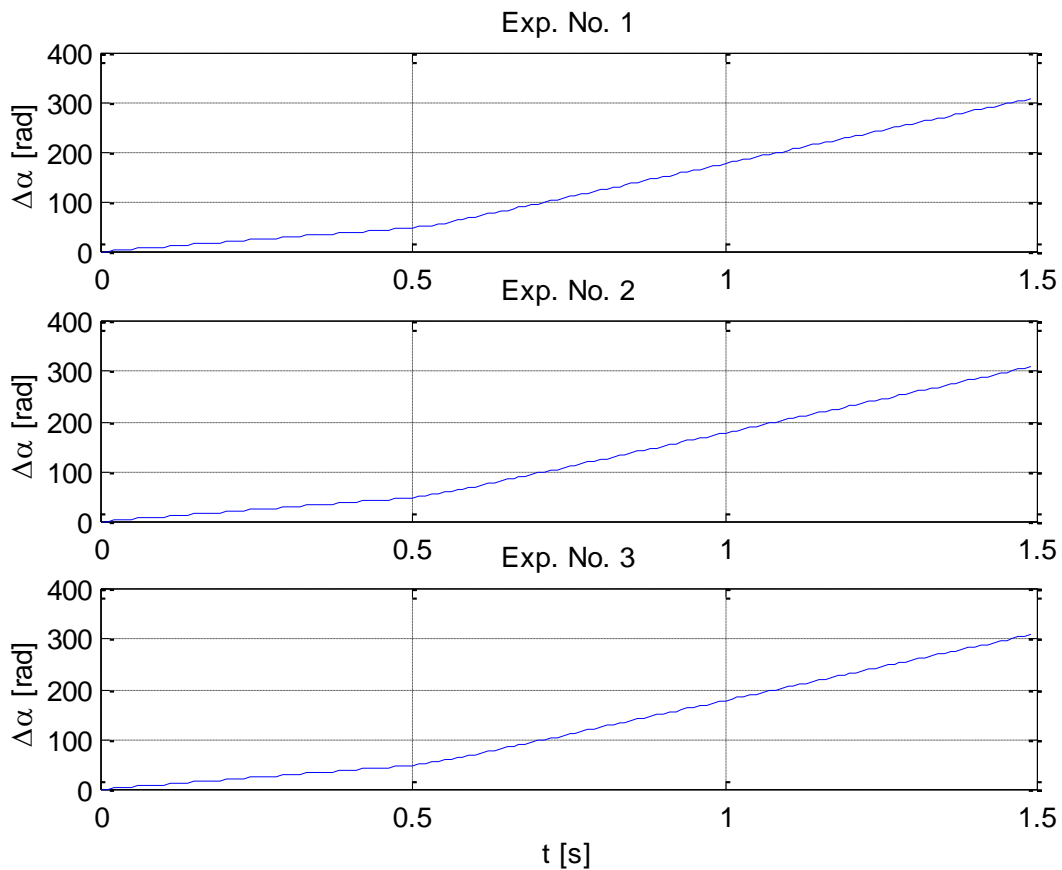
### 5.1. Identifikacija matematičkog modela motora

Parametri modela procesa ( $T_{em}$  i  $K_p$ ) i parametri regulatora se dobivaju sljedećim postupkom upotrebom izraza iz [1].

Koristeći program STEP 7 MicroWIN prebacuje se prethodno osmišljeni program „test\_ident“ sa PC-a na PLC. Taj program služi za snimanje podataka tijekom rada motora. Pohranjuju se vrijeme( $t$ ), pozicija( $\alpha$ ), brzina vrtnje( $\omega$ ) i referenca napona tranzistorskog H-mosta( $u$ ). Snimanje podataka traje 150 intervala  $T$  (vrijeme uzorkovanja,  $T = 0.01$  s). Prvih 0.5 sekundi napon  $u$  je podešen na 1 V, a poslije toga na 3 V. Treba napomenuti da je motor već u pogonu prije snimanja podataka što znači da iznosi  $\alpha$  i  $\omega$  u trenutku  $t = 0$  s neće biti jednaki nuli. Provedena su tri eksperimenta, a njihovi rezultati su pohranjeni u matlab datotekama „exp01.mat“, „exp02.mat“ i „exp03.mat“. Na [Slika 35] i [Slika 36] su prikazani rezultata eksperimenata.



Slika 35. Prikaz brzine vrtnje motora



**Slika 36. Prikaz pozicije motora**

Iz ovih podataka se vidi da je moguće podešavati brzinu vrtnje putem reference napona tranzistorskog H-mosta. Također se može zapaziti loša rezolucija mjerenja pozicije, a time i brzine vrtnje zbog inkrementalnog davača koji daje samo 25 impulsa po okretaju.

Sljedeći je korak za svako od tri mjerenja izračunati aritmetičku sredinu iznosa brzina vrtnji od intervala 1 do 49 te 101 do 150 ( $t_1 = 0 \dots 0.5$  s ;  $t_2 = 1 \dots 1.5$  s ) koristeći funkciju „mean“ u programskom paketu Matlab. Time se dobiva bolja procjena stvarne početne i konačne brzine vrtnje. Rezultati ovog izračuna su prikazani na [Tabela 13].

**Tabela 13. Dobivanje početne i konačne brzine vrtnje**

	$t = 0 \dots 0.5$ s	$t = 1 \dots 1.5$ s
exp01	$\omega_{ss1} = 95.912$	$\omega_{ss2} = 267.4$
exp02	$\omega_{ss1} = 95.4$	$\omega_{ss2} = 267.4$
exp03	$\omega_{ss1} = 94.886$	$\omega_{ss2} = 267.9$

Sličnim postupkom se dobivaju i vrijednosti pozicije ( $\alpha_0$  i  $\alpha_{FIN}$ ). Potrebne su nam pozicije u trenucima  $t = 0.5$  s i  $t = 0.7$  s. Ponovo se izračunavaju aritmetičke sredine za svako od tri mjerenja. Vrijednosti su prikazane na [Tabela 14].

**Tabela 14. Iznosi pozicije u trenucima  $t$**

	$t = 0.5$ s	$t = 0.7$ s
exp01	$\alpha_0 = 522.5$	$\alpha_{FIN} = 569.49$
exp02	$\alpha_0 = 518.98$	$\alpha_{FIN} = 565.97$
exp03	$\alpha_0 = 517.47$	$\alpha_{FIN} = 564.72$

Ove podatke treba uvrstiti u sljedeće jednadžbe (za svako od 3 mjerenja se računa zasebna vrijednost  $T_{em}$  i  $K_p$ ):

$$T_{em} = \frac{\omega_{ss2} T_{FIN} - \Delta\alpha}{\Delta\omega_{ss}}, \quad K_p = \frac{\Delta\omega_{ss}}{\Delta u}$$

gdje su:

$T_{em}$  – Elektromehanička vremenska konstanta [s] ;

$T_{FIN}$  - Vremenski interval između pozicija  $\alpha_{FIN}$  i  $\alpha_0$  [s],  $T_{FIN} = 0.2$  s ;

$\Delta\alpha$  - Razlika konačne i početne pozicije [rad],  $\Delta\alpha = \alpha_{FIN} - \alpha_0 = 47.08$  s ;

$\Delta\omega_{ss}$  – Razlika konačne i početne b.v. [rad/s],  $\Delta\omega_{ss} = \omega_{ss2} - \omega_{ss1} = 172.17$  rad/s ;

$\omega_{ss2}$  - Konačna brzina vrtnje [rad/s] ;

$\Delta u$  – Naponski skok sa tranzistorskog pretvarača.

Napokon, aritmetička sredina  $T_{em}$  i  $K_p$  se uzima kao rezultat koji glasi:

$$T_{em} = 0.03737 \text{ s},$$

$$K_p = 86.1 \frac{\text{Vs}}{\text{rad}}.$$

Slijede izrazi za dobivanje parametara regulatora [3]:

$$T_{e\omega} = \frac{1}{D_{2\omega}D_{3\omega}} \frac{T_{\Sigma}T_{em}}{T_{\Sigma} + T_{em}},$$

$$T_I = T_{e\omega} \left( 1 - \frac{D_{2\omega}T_{e\omega}}{T_{\Sigma} + T_{em}} \right),$$

$$K_R = \frac{1}{K_p} \left( \frac{T_{\Sigma} + T_{em}}{D_{2\omega}T_{e\omega}} - 1 \right),$$

$$K_I = \frac{K_R T}{T_I},$$

gdje su:

$T_{e\omega}$  - Ekvivalentna vremenska konstanta regulacijskog kruga [s] ;

$T_I$  - Integralna vremenska konstanta [s] ;

$K_R$  - Pojačanje regulatora [Vs/rad] ;

$K_I$  - Integralno pojačanje i PI regulatoru [Vs/rad];

$D_{2\omega}, D_{3\omega}$  – Optimalni iznosi karakterističnog odnosa,  $D_{2\omega} = 0.5$ ,  $D_{3\omega} = 0.4$  ;

$T_{\Sigma}$  - Vremenska konstanta parazitske dinamike [s],  $T_{\Sigma} = T + T_{par} = 0.0125$  s ,

$T$  - Vrijeme uzorkovanja [s],  $T = 0.01$  s ,

$T_{par}$  - Parazitska vremenska konstanta [s],  $T_{par} = 0.0025$  s ;

$T_{em}$  – Elektromehanička vremenska konstanta [s],  $T_{em} = 0.03737$  s ;

$K_p$  – Pojačanje procesa [Vs/rad],  $K_p = 86.1$  Vs/rad.

Parazitska vremenska konstanta ( $T_{par}$ ) u sebi sadrži sekundarne dinamičke efekte poput kašnjenja frekv. pretvarača  $T_{ch}$  i razmjerno malu vremensku konstantu armature motora  $T_a$ .

Dobivamo sljedeće iznose parametara:

$$T_{e\omega} = 0.046834 \text{ s ,}$$

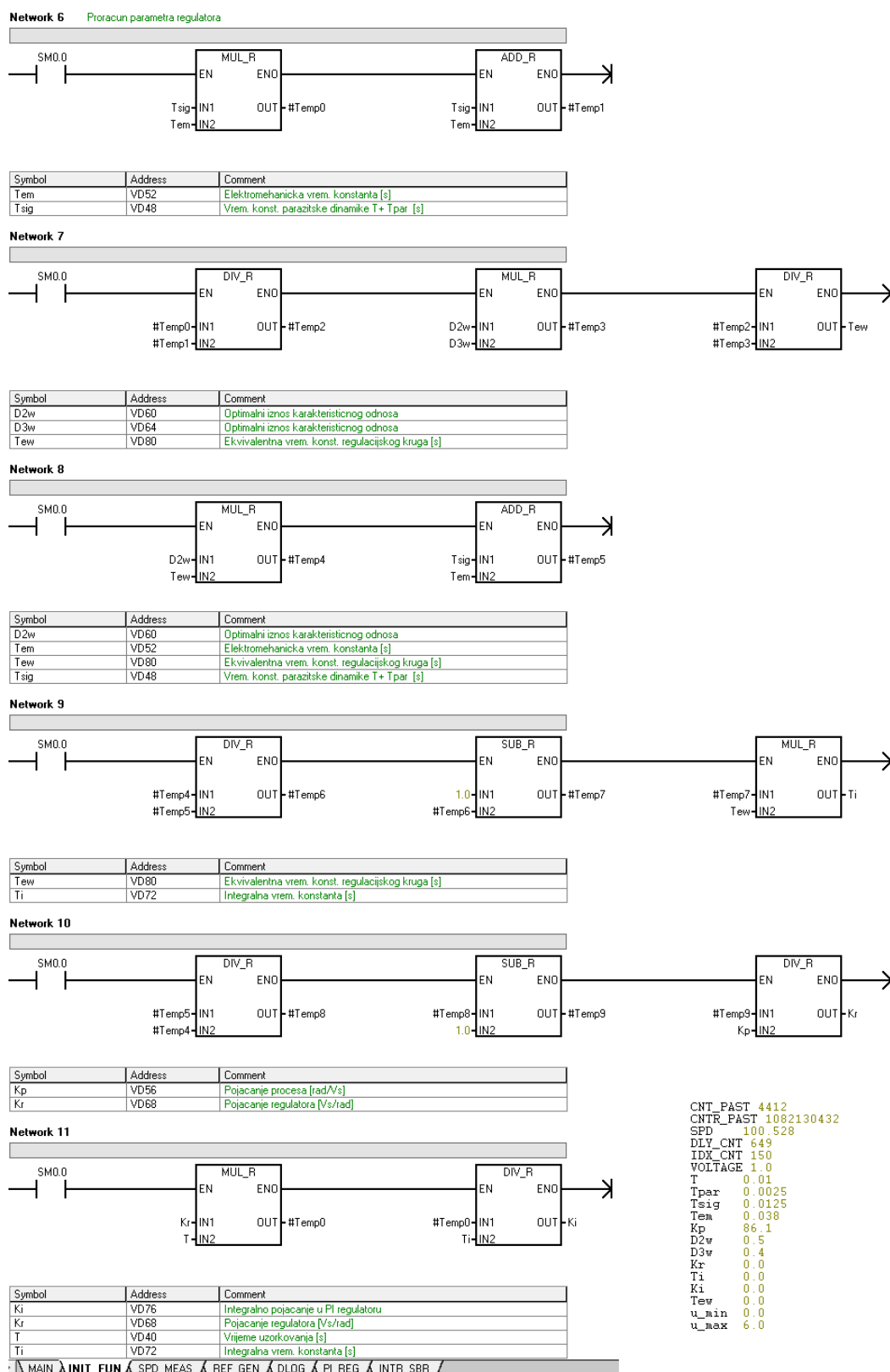
$$T_I = 0.024843 \text{ s ,}$$

$$K_R = 0.01312 \text{ Vs/rad ,}$$

$$K_I = 0.0052812 \text{ Vs/rad.}$$

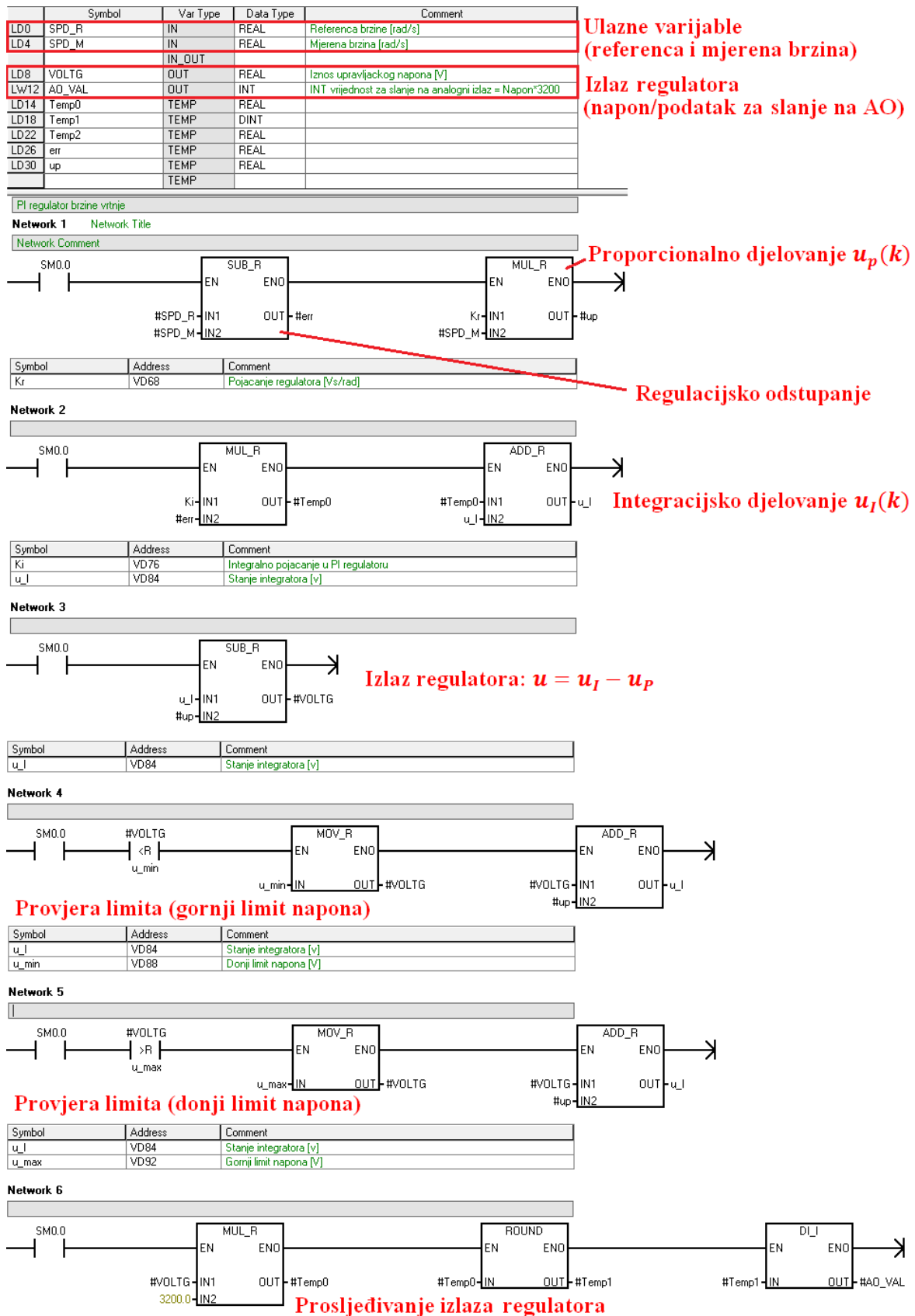
## 5.2. Implementacija PI regulatora u PLC-u

Proračun parametara regulatora se također izvršava u samom upravljačkom programu „test\_reg1“ u ladder dijagramu pod *Program Block* → *INIT\_FUN* → *Network 6 – 11*. Ovo je prikazano na [Slika 37].



Slika 37. Proračun parametara regulatora u programu, zajedno s Data Block-om

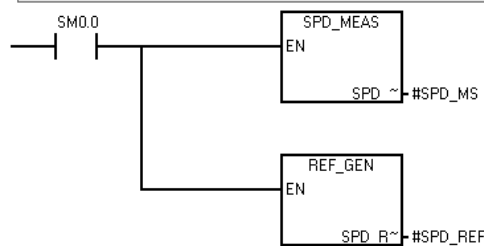
Na [Slika 38] i [Slika 39] je prikazana implementacija PI regulatora u STEP 7 MicroWIN-u.



Slika 38. Tab „PI\_REG“: Implementacija PI regulatora u STEP 7 MicroWIN-u

	Symbol	Var Type	Data Type	Comment
LD0	TEMPRO	TEMP	REAL	Privr. realna varijabla 0
LD4	SPD_MS	TEMP	REAL	Brzina vrtnje [rad/s]
LD8	SPD_REF	TEMP	REAL	Referenca brzine [rad/s]
LD12	VOLTG	TEMP	REAL	Napon na analognom izlazu [V]

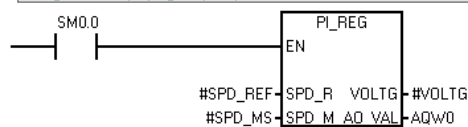
**Network 1** Poziv funkcije za mjerenje brzine vrtnje i generiranje reference brzine



**Zadavanje reference i određivanje brzine vrtnje**

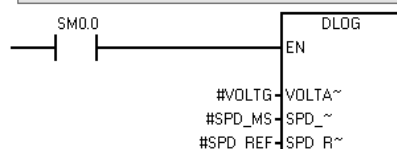
**Network 2** Ovdje treba doći poziv PI regulatora brzine vrtnje ...

PI regulator kao potprogram (SBR)



**Poziv PI regulatora**

**Network 3** Spremanje podataka



**Snimanje ključnih podataka (reference napona, mjerene brzine i reference brzine)**

**Slika 39. Tab „INTR\_SBR“**

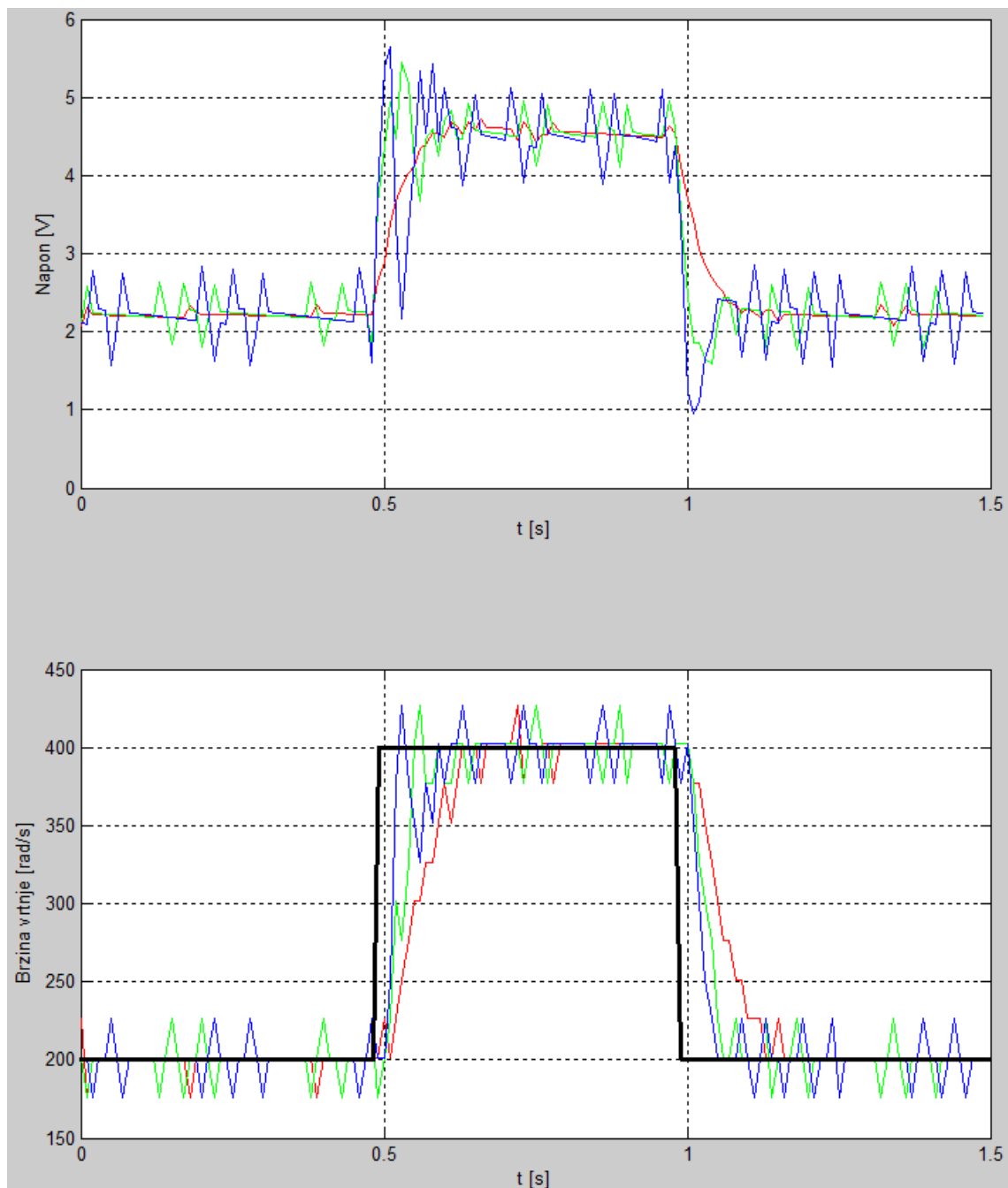
Na prethodnoj slici je prikazan prekidni (interrupt) potprogram za poziv vremenski kritičnih potprograma (uključuje PI regulator). Periodički se obavlja svakih 10 ms (vrijeme uzorkovanja).

	Symbol	Address	Comment
	CNT_PAST	VD0	Prošla vrijednost registra brojala HC1
	CNTR_PAST	VD4	Prošla vrijednost razlike stanja brojala (real)
	SPD	VD8	Trenutna brzina vrtnje [rad/s]
	HC1_RLOVR	M0.0	HC1 prebacaj
	START_CNT	M0.1	Pokreni odbrojavanje
	DLY_CNT	VD12	Brojilo 1, zadrška od 5 s
	IDX_CNT	VD16	Indeksno brojilo za spremanje podataka
	ADDRU	VD20	Pointer na adresu za spremanje napona
	ADDRW	VD24	Pointer na adresu za spremanje brzine
	VOLTAGE	VD28	Napon na ulazu u pretvarac
	ADDRWR	VD32	Pointer na adresu za spremanje ref. brzine
	WREF	VD36	Referentna brzina [rad/s]
	T	VD40	Vrijeme uzorkovanja [s]
	Tpar	VD44	Parazitska vrem. konstanta [s]
	Tsig	VD48	Vrem. konst. parazitske dinamike T + Tpar [s]
	Tem	VD52	Elektromehanička vrem. konstanta [s]
	Kp	VD56	Pojacanje procesa [rad/Vs]
	D2w	VD60	Optimalni iznos karakterističnog odnosa
	D3w	VD64	Optimalni iznos karakterističnog odnosa
	Kr	VD68	Pojacanje regulatora [Vs/rad]
	Ti	VD72	Integralna vrem. konstanta [s]
	Ki	VD76	Integralno pojacanje u PI regulatoru
	Tew	VD80	Ekvivalentna vrem. konst. regulacijskog kruga [s]
	u_I	VD84	Stanje integratora [v]
	u_min	VD88	Donji limit napona [V]
	u_max	VD92	Gornji limit napona [V]

**Slika 40. Tablica simbola (Symbol Table)**

### 5.3. Eksperimentalni rezultati

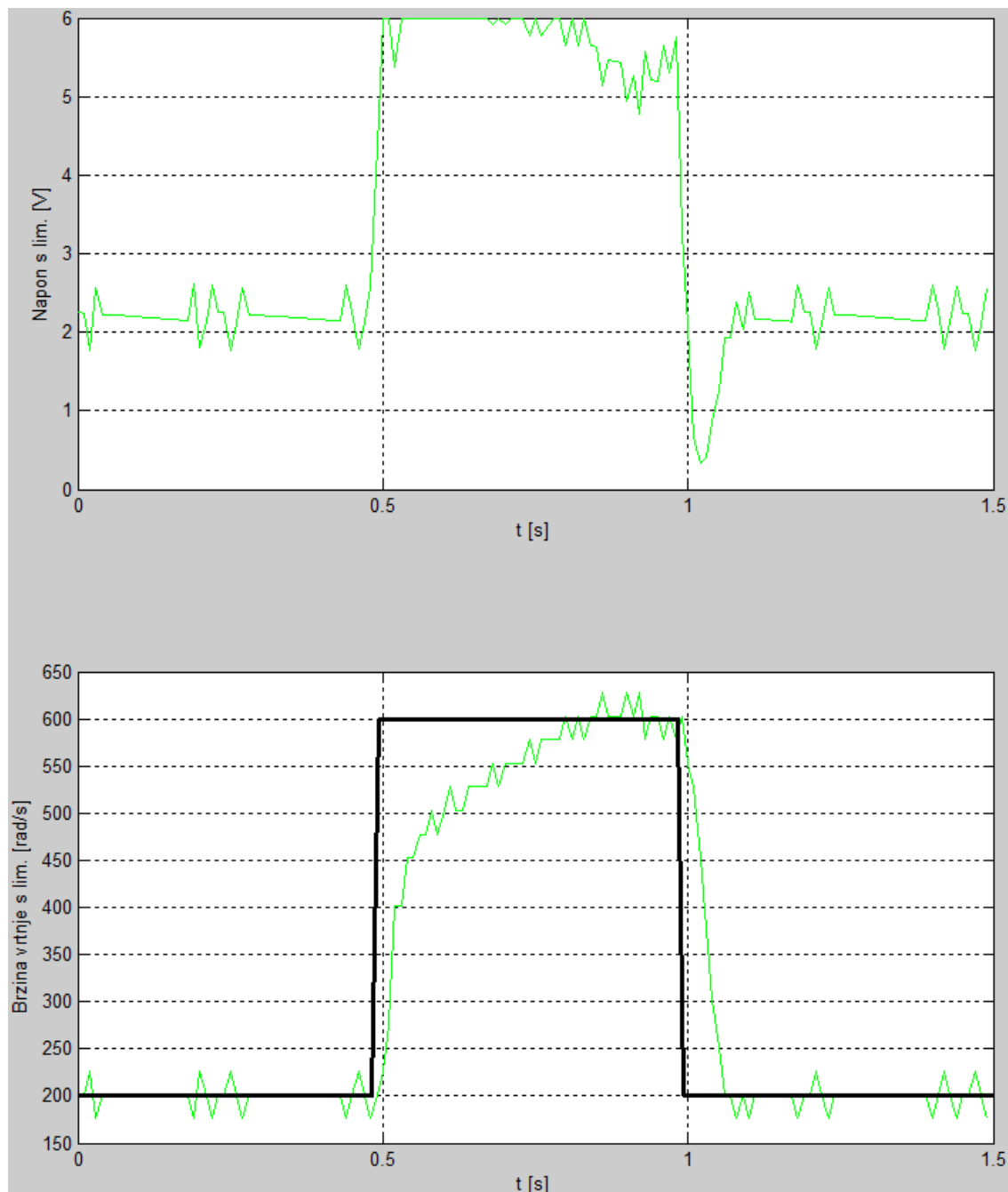
Nakon što je gotova maketa puštena u rad ustanovljeno je da PI regulator dobro regulira brzinu vrtnje (unatoč lošoj rezoluciji mjerenja brzine vrtnje zbog inkrementalnog davača sa samo 25 ureza). Parametar  $D_{3\omega}$  je eksperimentalno testiran [Slika 41] i ustanovljeno je da je vrijednost  $D_{3\omega} = 0.4$  najoptimalnija. Boje na [Slika 41] predstavljaju različite vrijednosti  $D_{3\omega}$ : **Crvena – 0.25, Zelena – 0.4, Plava – 0.5**. Crna boja predstavlja referentnu brzinu vrtnje.



Slika 41. Eksperimentalni rezultati s promjenjivim parametrom  $D_{3\omega}$



Na kraju, eksperimentalno je testiran i limiter napona. To se izvršilo povećanjem referentne brzine vrtnje na 600 rad/s. Ustanovljeno je da limiter limitira napon na maksimalnih 6 V kako bi i trebao. Rezultati ovog eksperimenta se vide na [Slika 42].



**Slika 42. Eksperimentalni rezultati testiranja limitera napona**

## 6. ZAKLJUČAK

Opisana je laboratorijska maketa istosmjernog (DC) motora male snage opremljenog pretvaračem snage zasnovanim na tranzistorskom H-mostu, jednostavnim jednokanalnim inkrementalnim davačem impulsa niske rezolucije u ulozi senzora pozicije (brzine) i Siemensovim programibilnim logičkim kontrolerom porodice SIMATIC S7-200 kao upravljačkom jedinicom unutar koje se implementira PI regulator brzine vrtnje DC motora.

U radu je opisan postupak identifikacije matematičkog modela DC motora opremljenog pretvaračem snage zasnovanim na tranzistorskom H-mostu, a koji se sastoji od snimanja statičke karakteristike (ulazno-izlazne naponske karakteristike) H-mosta, te identifikacije pojednostavljenog dinamičkog modela DC motora pogonjenog pretvaračem snage na temelju značajki odziva brzine vrtnje, odnosno pozicije motora na skokovitu promjenu reference napona pretvarača. Na temelju pojednostavljenog matematičkog modela motora proveden je postupak podešavanja PI regulatora brzine vrtnje primjenom kriterija optimuma dvostrukog odnosa. Predloženi PI regulator brzine vrtnje ispitan je simulacijama na računalu, te je potom implementiran u programibilnom logičkom kontroleru i ispitan eksperimentalno. Rezultati simulacijskih i eksperimentalnih ispitivanja potvrđuju da predloženi regulator osigurava zadovoljavajuću kvalitetu regulaciju u smislu brzine odziva i stabilnog vladanja regulacijskog kruga.

Daljnji rad može biti usmjeren prema identifikaciji potpunijeg modela DC motora, te optimiranju algoritma regulatora u smislu smanjenja vremena izvođenja, redefiniranjem trenutnog algoritma zasnovanog na aritmetici s pomičnim zarezom, u formulaciju s cjelobrojnomo aritmetikom.

## LITERATURA

- [1] D. Pavković, J. Deur: Modeling and Control of Electronic Throttle Drive, 2011.
- [2] D. Pavković: Nastavni materijali iz predmeta Elektromotorni servopogoni
- [3] D. Pavković: Nastavni materijali iz predmeta Mikroprocesorsko upravljanje
- [4] Nastavni materijali za laboratorijsku vježbu „Princip mjerenja brzine vrtnje istosmjernog strija primjenom inkrementalnog davača položaja“
- [5] M. Šiljevinac: Završni rad, 2008.
- [6] SIEMENS: SIMATIC S7-200 Programmable Controller System Manual, 2005.
- [7] [www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org)

## **PRILOZI**

- I. CD-R disc
- II. Električna shema tranzistorskog pretvarača s PWM sklopom
- III. UC3638 „Advanced PWM Motor Controller“ data sheet